

Tesis Doctoral

Aplicaciones del análisis modal a la peritación de edificios
civiles con estructura de fábrica.

El caso de la edificación civil sevillana.

Presentada por: Enrique Vazquez Vicente

Arquitecto

Dirigida por: José Sanchez Sánchez

Doctor Arquitecto

para la obtención del grado Doctor por la Universidad de Sevilla

Departamento de Estructuras de Edificación, e Ingeniería del Terreno

Universidad de Sevilla

Sevilla, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN E INGENIERÍA DEL TERRENO

Octubre 2015

AUTOR: Enrique Vázquez Vicente

Director: José Sánchez Sánchez

A mi padre

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han ayudado, de forma directa o indirecta, a que esta tesis haya llegado a su fin.

Quiero comenzar agradeciendo la inestimable ayuda de mi primer director de tesis, Felix Escrig Pallarés, que durante mi formación y en mi carrera docente ha sido una constante fuente de inspiración. Lamentablemente su repentina muerte nos ha dejado desabrigados a todos los que tuvimos el honor de tenerle como mentor y referente.

Agradezco al José Sánchez Sánchez que se hiciera de cargo del relevo en la dirección de la tesis y que me haya guiado hasta el final, permitiéndome desarrollar mis inquietudes.

A María Jesús por proporcionarme el tiempo necesario y por las correcciones de documento.

Agradezco al Rafael López Palanco la inyección de nuevos conocimientos que ha supuesto cada visita a su despacho.

Al Miguel Ángel Cobreros y a David Lázaro, que tutorizaron mis primeros años de docencia y con los que he compartido discusiones estructurales muy clarificadoras.

Debo agradecer al Antonio Jaramillo Morilla la idea inicial de la tesis, que surgió durante los trabajos en los que me invitó a colaborar.

Agradezco a todos los colegas del Departamento su compañerismo y comprensión, al permitirme un horario de clases compatible con la redacción de esta tesis. Y a Victor Compán, Teresa Rodríguez, Jaime Aguilar, Andrés Sáez, Esperanza Rodríguez, Pablo Pachón, Antonio Delgado, por escucharme y aconsejarme, y en general por todos los ofrecimientos de apoyo.

A los alumnos colaboradores, Adrián Cancho, Carmen Salado, Abraham Álvarez, Irene Quilón, María Lara, Arleth Aguilar y Ángela Alonso, que han ayudado desinteresadamente en la elaboración de los modelos.

Abstract

During the professional activity of building technicians usually appears the need to ensure the structural safety of domestic buildings with masonry structure. This activity is usually not addressed with the same intensity that in other more important buildings in which a comprehensive recognition and a large number of destructive or not destructive tests are performed

Masonry structure buildings have low stresses and a stable and monolithic spatial configurations. However, they can be affected by pathological processes, which may end in a dislocation of the elements. This greatly affects the stability of the whole structure.

Unlike in monumental building, in residential buildings damages may have been “camouflaged” by users. It is difficult to find them hidden by wallpaper, paneling, or behind a wardrobe.

The author of the thesis is member of the research group TEP-114 which is developing a damage detection method by using simple dynamic tests to be applied in residential buildings with masonry structure.

In order to produce concise results, the scope of this study has therefore been confined to the topic: the traditional sevilian domestic building. This building type has quite homogeneous morphological, constructive and structural characteristics. This has allowed us to systematize the research through the study of various archetypes.

Theoretical studies in this thesis provide references that will allow to analyze the dynamic tests to be performed to complete the research project

A review of current methods of research in this field is presented after the introductory chapter.

The third chapter describes the features of the object of study, the traditional sevilian domestic building. Its geometric configuration, building characteristics and common damages.

Chapter four shows the theoretical framework for selecting and evaluating the set of parameters that will be used to create the models. In addition, it displays the calculation method chosen to obtain the results that this thesis analyzes.

Chapter five describes the construction of the models, by parametric design tools: Rhinoceros and Grasshopper.

Models have been calculated using Sap2000 v16, performing two analysis methods, modal and PSD. Results are shown in annex 3 and discussed in Chapter 6.

Chapter 7 presents the conclusions and proposes next steps to be taken to complete the research project

Resumen

Durante la actividad profesional de los técnicos de edificación suele aparecer con frecuencia la necesidad de garantizar la seguridad estructural de edificios domésticos con estructura de obra de fábrica. Esta actividad no suele abordarse con la misma intensidad que en edificios más importantes, en los que se realiza un reconocimiento exhaustivo y un importante número de ensayos.

Los edificios con estructura de fábrica de ladrillo se caracterizan por tener unas tensiones de trabajo relativamente bajas y una configuración espacial bastante monolítica y estable. Sin embargo, se ven afectados por procesos patológicos que pueden terminar en una desestructuración de los elementos, afectando en gran manera a la estabilidad del conjunto.

A diferencia de lo que ocurre en la edificación monumental, es muy frecuente que las lesiones en edificios residenciales hayan sido “camufladas” por los propios usuarios y no es fácil encontrarlas ocultas por papel pintado, trasdosados o tras un armario.

El grupo de investigación TEP-114, del que forma parte el autor de la tesis, está trabajando en el desarrollo de un método de detección de daños en los edificios residenciales con estructuras de obra de fábrica, mediante ensayos dinámicos sencillos.

Para ello, se ha seleccionado un ámbito de estudio suficientemente acotado: la edificación tradicional sevillana. Este tipo edificatorio presenta características morfológicas, constructivas y estructurales bastante homogéneas. Esto nos ha permitido sistematizar la investigación mediante el estudio de varios arquetipos.

En la presente tesis se realizan los estudios teóricos que generarán las referencias para analizar los ensayos dinámicos que se efectuarán para completar el proyecto de investigación.

Para ello, tras el capítulo introductorio se hace una reseña de los métodos actuales de investigación en este campo.

En el tercer capítulo se describen las características del objeto de estudio, la edificación doméstica tradicional sevillana. Su configuración geométrica, tipos constructivos y lesiones habituales.

A lo largo del capítulo cuatro se expone el marco teórico que permite seleccionar y valorar el conjunto de parámetros con los que se van a construir los modelos. Se describe además el método de cálculo PSD, seleccionado para obtener los resultados que esta tesis analiza.

En el capítulo cinco se describe la construcción de los modelos, para los que se ha contado con la ayuda de herramientas de diseño paramétrico: Rhino y Grasshopper.

Los modelos han sido calculados mediante el programa Sap2000 v.16, realizando en cada uno dos tipos de análisis: modal y PSD. Los resultados de estos cálculos se exponen en las gráficas del anejo 3 y se analizan en el capítulo seis.

En el capítulo siete se exponen las conclusiones y se proponen los siguientes pasos a seguir para concluir el proyecto de investigación, así como nuevas líneas de desarrollo.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	3
1.1	Antecedentes	3
1.1.1	Síntomas y causas	3
1.1.2	Pronóstico	6
1.1.3	Control del pronóstico.	10
1.2	Finalidad.	12
2.	Definición del problema, objetivos y metodología	13
2.1	Objetivo general	13
2.2	Objetivos específicos	14
2.3	Estado actual de los conocimientos científico-técnicos	14
2.3.1	Peritación estructural de edificios de obra de fábrica	14
2.3.2	Reconocimiento dinámico de las estructuras	17
2.3.3	Grupos de investigación trabajando en líneas afines	25
2.3.4	Dinámica de las estructuras de obra de fábrica.. . . .	26
2.4	Formulación del problema de investigación	36
2.5	Método de investigación.	38
3.	Marco referencial. La vivienda civil sevillana	39
3.1	Formación de las manzanas	39
3.2	Catálogo de tipos edificatorios	41
3.3	Definición constructiva.	46
3.3.1	Cimientos.	46
3.3.2	Muros.	50
3.3.3	Forjados.	52
3.3.4	Huecos	60
3.4	Lesiones habituales.	60
3.4.1	Estado de conservación	60
3.4.2	Cimientos.	62
3.4.3	Muros.	62
3.4.4	Forjados.	66
3.4.5	Huecos	68
4.	Marco teórico y parámetros estudiados	69
4.1	Parámetros que influyen en las características vibratorias.	69

4.1.1 Tipo geométrico	69
4.1.2 Dimensiones espaciales	81
4.1.3 Influencia del espesor y características mecánicas de los muros	81
4.1.4 Influencia del forjado y sus características geométricas y mecánicas. El efecto diafragma	86
4.1.5 Influencia de la manzana	92
4.1.6 Influencia de las lesiones	97
4.2 Análisis dinámico por elementos finitos	102
4.2.1 El método PSD	102
4.2.2 Parámetros empleados en los modelos.	103
5. Descripción de los modelos	105
5.1 Parametrización y construcción de los modelos.. . . .	105
5.2 Parámetros empleados.	112
6. Resultados: Influencia de los distintos parámetros en el resultado del análisis modal mediante MEF.	119
6.1 Rango de frecuencias.	119
6.2 Interpretación de las gráficas PSD.	121
6.3 Influencia del tipo geométrico.	124
6.4 Influencia de las dimensiones espaciales.	126
6.5 Influencia del módulo de elasticidad de los muros	130
6.6 Influencia del efecto tipo de forjado	134
6.7 Influencia del efecto diafragma del forjado	137
6.8 Influencia de la manzana.	140
6.9 Influencia de las lesiones.	143
7. Conclusiones y futuras líneas de investigación	151
7.1 Conclusiones	151
7.2 Futuras líneas de investigación	152
A.1. ANEJO 1	155
A.2. ANEJO 2	177
A.3. ANEJO 3	189
REFERENCIAS	221

1. Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Síntomas y causas

Durante las colaboraciones que, como consultor de estructuras y cimentaciones, he realizado con arquitectos y constructoras durante los últimos 20 años, he tenido ocasión de inspeccionar un número significativo de edificios realizados con estructura de obra de fábrica (ver Tabla 1–1). Entre los analizados en el área de Sevilla capital, he encontrado que muchos de ellos presentaban lesiones similares, consistentes en la aparición de grietas entre los muros de carga y de atado.

La desconexión entre muros de cargas y de través producen la desestructuración el conjunto, haciéndolo inestable a largo plazo.

Tabla 1–1: Edificios visitados en Sevilla con estructura de obra de fábrica

Alameda Hércules 47	Calle Pacheco y Núñez de Prado 25
Calle Almirante Hoyos 14	Calle Reyes Católicos 9
Calle Calderón de la Barca 6	Calle Rodríguez Marín 7
Calle Corral del Rey 14	Calle San Felipe
Calle Francos 9	Calle Sol 8
Calle Guzmán El Bueno	Calle Sol 55
Calle Jesús del Gran Poder 93	Calle Sol 119
Calle Juzgado 6	Calle Sol 130
Avda María Auxiliadora 8	Calle Sol 134
Calle Marco Sancho 20	Calle Teodosio 6
Calle Molino	Calle Zaragoza 36

Los edificios con estructura de fábrica de ladrillo se caracterizan por tener unas tensiones de trabajo relativamente bajas y una configuración espacial bastante monolítica y estable. Sin embargo, se ve afectado por procesos patológicos que pueden terminar en una desestructuración de los elementos, afectando en gran manera a la estabilidad del conjunto. Dichos procesos pueden deberse a cargas excesivas, a movimientos de origen sísmico a modificaciones estructurales importantes realizadas por los usuarios y en la mayoría de los casos a movimientos en el suelo originados por diversas causas.

El tipo estructural objeto de esta investigación suele estar situado sobre un terreno de baja capacidad portante, y con un cimiento insuficiente.



Fig 1-1: Desplazamiento entre zócalos de azulejo
Imagen propia.

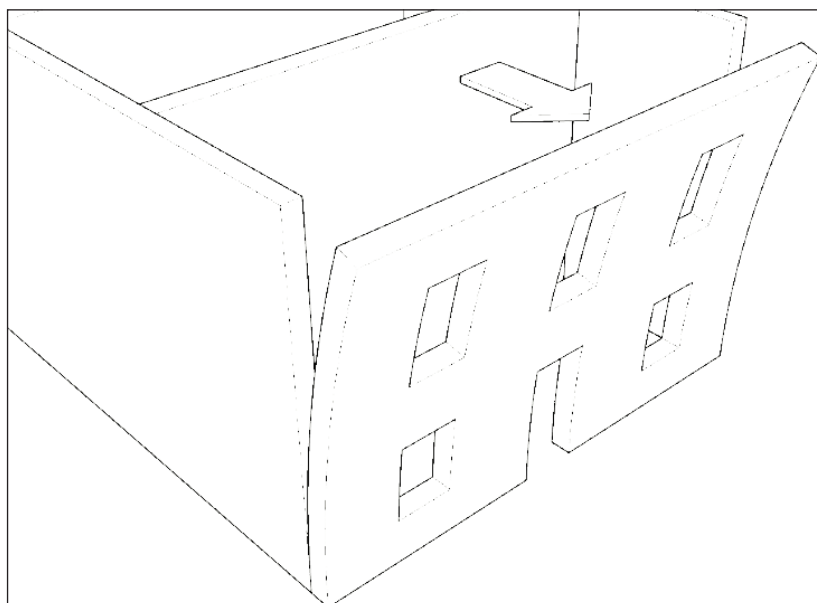


Fig 1-2: Desplazamiento entre zócalos de azulejo
Imagen propia.



Fig 1-3: Desplazamiento entre zócalos de azulejo y fisura en muros de planta baja
Imagen propia.

Fig 1-4: Inestabilidad del edificio por desconexión entre muros de carga y de atado.
Imagen propia.



En concreto, suele tener el mismo cimiento para muros de carga y de través, por lo que unos asientan más que otros. Si el asiento en los muros de carga es muy superior al de los muros de atado se produce la rotura. En las fotografías Fig 1-1 y Fig 1-2 el desplazamiento entre los zócalos cerámicos hace visible la patología, el asiento relativo entre los muros.

En la foto de la Fig 1-3 se puede apreciar la grieta entre los dos muros.

Cuando este proceso se inicia, comienza a disminuir la estabilidad de la estructura, los elementos que la forman trabajan desconectados unos de otros, pudiendo llegar a comprometer la integridad del conjunto (Fig 1-4).

En los ensayos llevados a cabo durante la inspección de edificios se ha detectado que, en algunos casos, el análisis vibratorio era capaz de señalar la pérdida de estabilidad por la aparición de lesiones en la unión entre muros. Los resultados obtenidos evidenciaban la existencia de alguna anomalía y la revisión minuciosa de los elementos estructurales se comprobó que algunos muros no estaban trabajando de manera solidaria (Fig 1-5 y Fig 1-6).

Es por esto que se plantea en esta tesis la posibilidad de desarrollar un método de diagnóstico de integridad de las estructuras de muros de obra de fábrica, mediante ensayos dinámicos sencillos en puntos estratégicos del edificio. Así como establecer su ámbito de aplicación, adaptando la técnica a las características específicas de cada estructura.

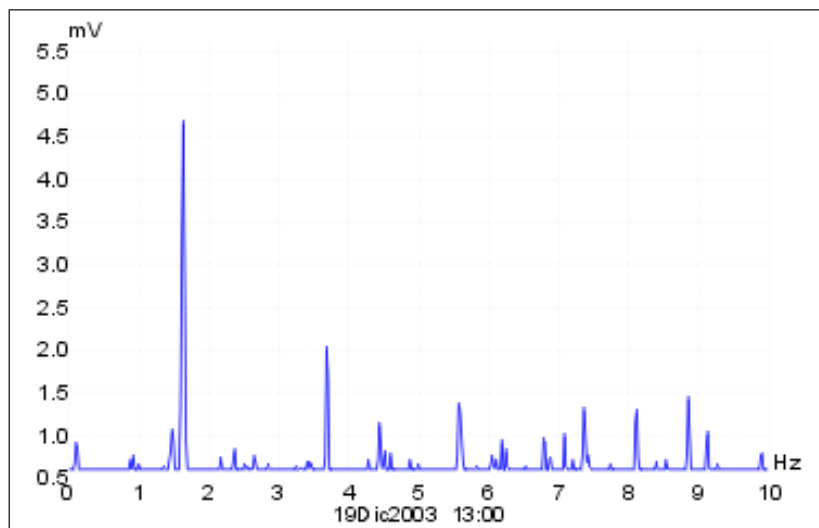


Fig 1-5: Gráfica FFT del ensayo dinámico efectuado en edificio en C/ Reyes Católicos. Sevilla.
Imagen propia.

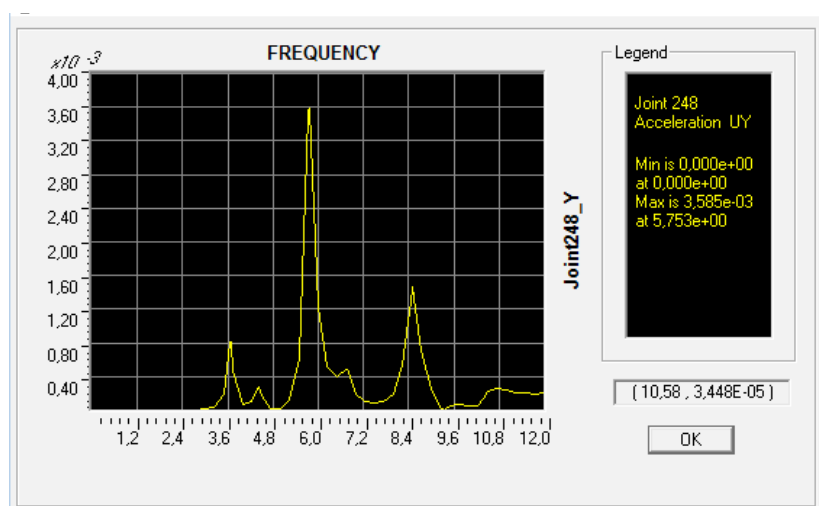


Fig 1-6: Gráfica PSD de modelo de elementos finitos correspondient al edificio en C/ Reyes Católicos
Imagen propia.

1.1.2 Pronóstico

La existencia de grietas que anulen la colaboración entre muros de carga y de través disminuye de forma importante la estabilidad del conjunto. El edificio puede mantener su integridad durante años, resistiendo únicamente esfuerzos gravitatorios, pero con un aumento muy importante del riesgo sísmico. En los casos más graves podría producirse el colapso del edificio motivado por vibraciones de tráfico, del uso, de trabajos en edificios colindantes, la lluvia ..., como los que se han producido en los últimos años por toda España (Fig 1-7 a Fig 1-12).

Fig 1-7: Derrumbe en Riudoms en 2009. imagen EFE

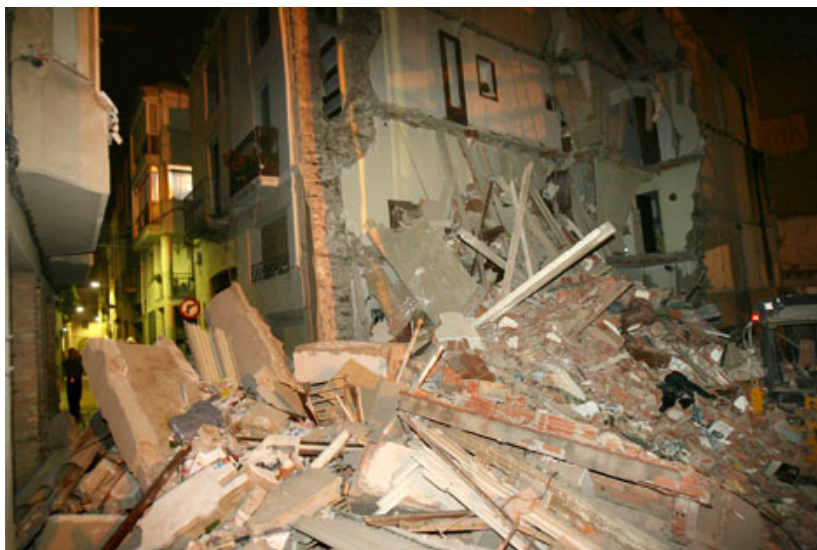


Fig 1-8: Derrumbe en Mataró en 2010. imagen El Mundo



Fig 1-9: Derrumbe en Lérida en 2012. imagen ABC





Fig 1–10: Derrumbe en Vigo en 2011. imagen La voz de Galicia



Fig 1–11: Derrumbe en Laredo en 2013. imagen Diario Montañez



Fig 1–12: Derrumbe en Madrid en 2015. imagen ABC

Fig 1-13: Desplome de la fachada de un edificio durante el terremoto de Lorca.



Fig 1-14: Desplome de cubiertas y forjados durante el terremoto de Lorca.



Tras el terremoto de Lorca se ha comprobado la fragilidad real de muchos edificios que aparentemente presentaban un buen estado de salud estructural (Fig 1-13 y Fig 1-14).

En las visitas de inspección que he tenido ocasión de realizar, he visto como en muchos casos aparecen a simple vista síntomas de desestructuración, ya sea por asiento en la cimentación, por intervenciones descontroladas de los propietarios u otros motivos. Sirven de ejemplo las figuras 1-1 a 1-3 y las que ilustran el punto 3.4

En la Fig 1-15 se expone el plano realizado por la Gerencia de Urbanismo de Sevilla en 1995¹, podemos ver como aún existen un gran número de edificios (marcados en blanco) sin rehabilitar en Sevilla.

1 Sevilla. Gerencia Municipal de Urbanismo, J. García Tapial y León, and M. J. García Jaén, *El conjunto histórico de Sevilla : avance del Plan Especial de Protección*. Sevilla: Ayuntamiento de Sevilla, Gerencia Municipal de Urbanismo, 1995

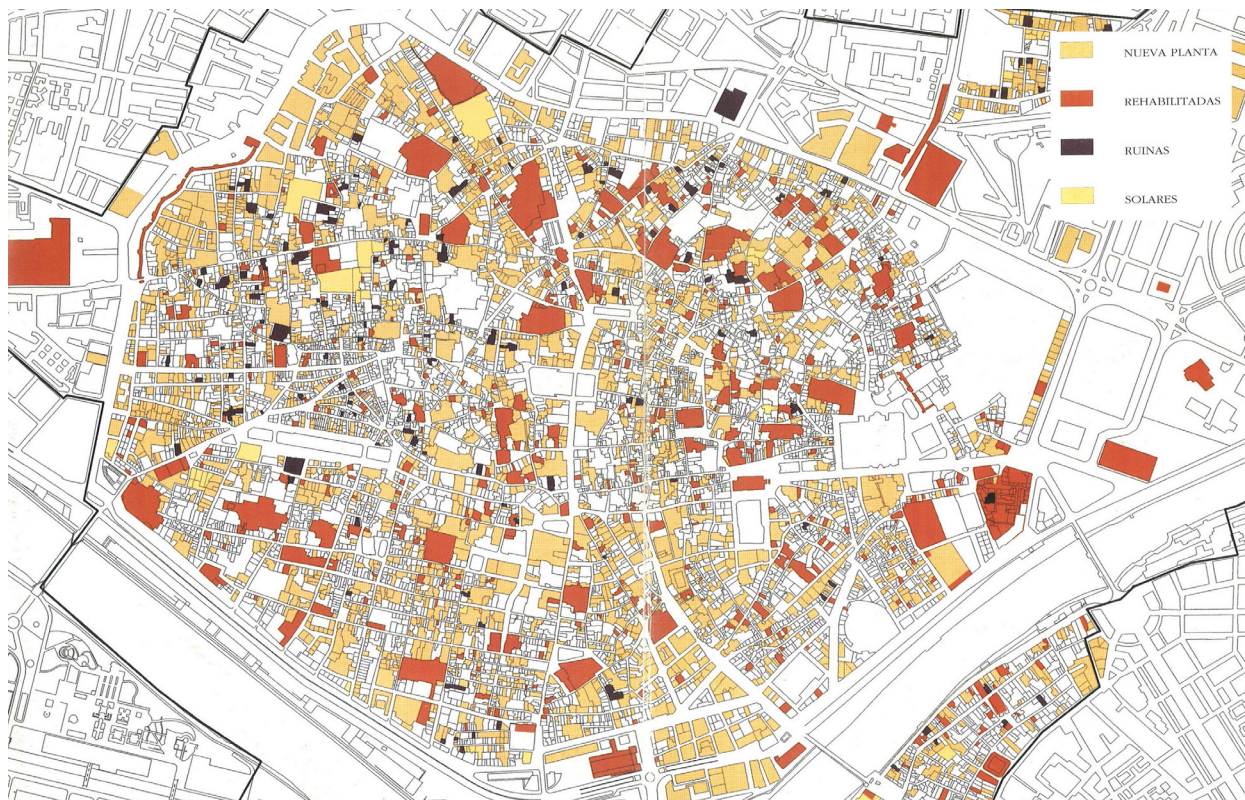


Fig 1–15: Proceso de renovación de la edificación del casco histórico de Sevilla.

1.1.3 Control del pronóstico

La solución en los casos con el tipo de lesiones indicado anteriormente es la reestructuración del edificio, mediante cosido de los muros, creación de nuevas trabas, etc. En muchos casos, la solución de refuerzo estructural es simple y no conlleva grandes obras². En otros es necesaria una intervención más amplia. Pero en cualquier caso, es necesaria previamente un diagnóstico correcto del problema.

Tras el terremoto que devastó la ciudad italiana de L'Aquila en 2009, se pudo comprobar como edificios que incluían refuerzos específicos para deformaciones horizontales han mantenido su integridad estructural³ (ver Fig 1–16 y Fig 1–17)

2 Lagomarsino, S., & Magenes, G. (2009). Evaluation and Reduction of the Vulnerability of Masonry Buildings. In G. Manfredi & M. Dolce (Eds.), *The state of Earthquake Engineering Research in Italy: the ReLUIS-DPC 2005-2008 Project* (pp. 1–50). Doppiavoce, Napoli, Italy.

3 Bazzuro, P., Franco, G., & Alarcon, J. (2009). Observations from the Magnitude 6.3 L'Aquila Earthquake. Retrieved September 28, 2015, from <http://www.air-worldwide.com/Publications/AIR-Currents/Observations-from-the-Magnitude-6-3-L%E2%80%99Aquila-Earthquake/>

Fig 1–16: Lesiones en muro de edificio en L'Aquila, tras el sismo de 2009
imagen Bazzuro, P., Franco, G., & Alarcon, J. (2009).



Fig 1–17: Edificio en L'Aquila, tras el sismo de 2009. Puede comprobarse que existen refuerzos metálicos en los muros y que no el temblor no ha provocado lesiones apreciables..
imagen Bazzuro, P., Franco, G., & Alarcon, J. (2009).



La detección de lesiones no es fácil en este tipo edificatorio. Las lesiones, muchas veces, no están visibles. Pueden estar en sitios poco accesibles, o incluso pueden haberse “ocultado” de forma consciente, por ejemplo bajo un papel pintado o tras un armario (ver fig. 3-37)

Actualmente se están aplicando en ingeniería civil e industrial técnicas no destructivas, basadas en análisis vibratorio, para localizar fallos estructurales. En el ámbito de la arquitectura, estas técnicas se están aplicando a edificios importantes, como grandes rascacielos, y en conservación de monumentos. En este trabajo se propone una técnica basada en análisis dinámico para la detección de daños.

1.2 Finalidad

Los edificios civiles de estructura de fábrica constituyen el conjunto más numeroso de construcciones del patrimonio español. Sin embargo, es la tipología que se estudia con menor rigor, ya que las técnicas de ensayo en fábrica no han avanzado tanto como en otros tipos estructurales.

Como se expone en Binda & Saisi⁴, muchas de las características constructivas de estos edificios son también habituales en otros países mediterráneos, como Italia, Grecia, Turquía o países del norte de África. Por ello, el estudio de este tipo constructivo puede ser útil para una zona geográfica muy amplia.

La finalidad de la presente tesis doctoral es el estudio teórico de las características dinámicas de la edificación doméstica sevillana con estructura de muros de fábrica y la influencia que en dichas características tienen las lesiones.

Se pretende comprobar, de forma teórica, si es posible realizar un diagnóstico de la estabilidad estructural del edificio mediante ensayos dinámicos sencillos.

Para ello se va a realizar el cálculo mediante elementos finitos de una serie de modelos representativos de distintas configuraciones arquitectónicas y constructivas, con distintas dimensiones y distintas propiedades físicas de sus materiales.

Se van a realizar estos cálculos en modelos sin lesiones y se van a repetir en modelos en los que se discretizará un tipo de lesión muy característico del entorno urbano de Sevilla: la desconexión entre los muros de carga y de atado.

Tras comparar los resultados de los cálculos de modelos “sanos” y lesionados mediante gráficas de densidad espectral de potencia (PSD), se comprobará que las diferencias en dichas gráficas son suficientemente importantes como para esperar que en los ensayos reales se manifiesten también diferencias significativas.

4 L. Binda and A. Saisi, “Knowledge of the building, on site investigation and connected problems,” in *Eurocode 8 perspectives from the Italian Standpoint Workshop*, 2009

2. Definición del problema, objetivos y metodología

2.1 Objetivo general

El análisis vibratorio se ha revelado como una herramienta muy potente, tanto para ajustar parámetros de los materiales, como para comprobar la fiabilidad del modelo informático de cálculo, en ocasiones distorsionado por la existencia de discontinuidades ocultas.

Actualmente, su aplicación en edificación se reserva al diagnóstico de puentes, grandes edificios y monumentos. El avance que esperamos obtener con esta tesis es la optimización de la técnica para su aplicación en edificios con estructura de obra de fábrica, que en España constituye un porcentaje muy alto de su patrimonio edificado.

Todas las estructuras tienen un comportamiento dinámico propio. En el caso de las estructuras de obra de fábrica ese comportamiento es muy sensible a los cambios que introducen las lesiones. Por tanto, en una parte importante de los edificios de obra de fábrica, es factible detectar, en mayor o menor grado, esas modificaciones.

La idea principal de esta investigación es el desarrollo de un método de diagnóstico de integridad de las estructuras de obra de fábrica mediante ensayos dinámicos sencillos ejecutados en zonas concretas del edificio, que pueda plasmarse finalmente en un PROTOCOLO DE ENSAYOS.

La caracterización dinámica de edificios se está efectuando actualmente con equipos complejos y caros. Para que la técnica propuesta pueda implantarse rápidamente en la inspección de edificios domésticos se requiere que el equipamiento sea asequible y ligero. Esta investigación debe demostrar si con un equipo de estas características pueden obtenerse datos suficientemente reveladores para realizar un correcto diagnóstico de la estructura.

El desarrollo y puesta a punto de un sistema como el que se propone influiría de manera muy positiva en la forma actual de intervenir en los edificios existentes con estructura de obra de fábrica.

El objetivo principal de la investigación será realizar el trabajo teórico que asiente las bases de ese protocolo de ensayos. Para ello, deberán obtenerse conclusiones acerca de los resultados esperados.

2.2 Objetivos específicos

Para la consecución del objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- a) Estudio de los tipos concretos de edificación doméstica sevillana.
 - Clasificación tipológica.
 - Búsqueda de un cuadro patológico específico de los tipos edificatorios habituales.
- b) Definición de los principales parámetros mecánicos y geométricos que intervienen en el problema.
- c) Determinación de la influencia de los parámetros en las características dinámicas de cada tipo.
- d) Determinación de la influencia de las lesiones en las características dinámicas.

2.3 Estado actual de los conocimientos científico-técnicos

2.3.1 Peritación estructural de edificios de obra de fábrica

El reconocimiento de las estructuras de obra de fábrica suele ser un tema difícil. Es importante conocer las características mecánicas de los diferentes elementos constructivos involucrados, para poder verificar la seguridad de los niveles tensionales que experimentan los elementos.

Una clasificación de las técnicas de investigación podría diferenciarlas en técnicas destructivas y técnicas no destructivas.

En el primer grupo, técnicas destructivas, lo más habitual, para el tipo de edificios objeto de la tesis doctoral, es la toma de muestras para análisis químico en laboratorio. Además, si es posible, pueden extraerse probetas para ensayos de rotura. Este tipo de ensayo tiene gran fiabilidad, pero debido al tamaño necesario de las muestras no es usual en edificación doméstica.

Dentro del segundo grupo, técnicas no destructivas, podemos encontrar las técnicas basadas en la propagación de ondas mecánicas (métodos directos sónicos ultrasónicos, impacto-eco, tomografía sónica y ultrasónica) o electromagnéticas (técnicas radar, tomografía de radar), la termografía infrarroja, la endoscopia, las técnicas basadas en aspectos tensionales como los Gatos planos, Hole-Drilling y Dilatometría.

La bibliografía existente en la materia es muy amplia. Sirva el listado siguiente como muestra:

- Binda, L., Saisi, A., & Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*, 14(4), 199–233. doi:10.1016/S0950-0618(00)00018-0
- Boscato, G., Dal Cin, A., Riva, G., Russo, S., & Sciarretta, F. (2014). Knowledge of the Construction Technique of the Multiple Leaf Masonry Façades of Palazzo Ducale in Venice with ND and MD Tests. *Advanced Materials Research*, 919-921, 318–324. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.919-921.318

- Esbert, R. M. (1997). Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos (Vol. 5). Barcelona: Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona.
- Gimeno, J. M. F., Sanjosé, J. M., Franco Gimeno, J. M., Martín Sanjosé, J., & Universitarias, U. de Z. P. (1999). Ensayos no destructivos para industria y construcción. Textos docentes (1a. ed., Vol. 66). Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Lombillo, I., Villegas, L., & Elices, J. (n.d.). Técnicas no destructivas aplicables al diagnóstico de muros de fábrica. In Patorreb 09.
- Lombillo, I., Villegas, L., Silió, D., Hoppe, C., & GETED-UC. (2008). Evaluación no destructiva del patrimonio construido. Revista Internacional Construlink, 6(16), 40–53.
- Monteagudo Viera, S. M. (2010). Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Retrieved from <http://oa.upm.es/4793/>
- Moon, F. L., Yi, T., Leon, R. T., & Kahn, L. F. (2007). Testing of a full-scale unreinforced masonry building following seismic strengthening. Journal of Structural Engineering, 133(September), 1215–1226. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:9(1215)
- Pardo, E. S., & Histórico, I. A. del P. (1996). Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos. Cuadernos técnicos / Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Sevilla: Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.
- Parisi, F., & Augenti, N. (2012). Experimental data analysis for mechanical modelling of existing brick masonry structures. In 15 World Conference on Earthquake Engineering. Retrieved from http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2898.pdf
- Pérez-Gálvez, F., Rodríguez-Liñán, C., & Rubio, P. (2009). Determinación de las características mecánicas de los muros de fábrica de ladrillo en la arquitectura doméstica sevillana de los siglos XVIII Y XIX. Informes de La Construcción, 61(514), 19–28. doi:10.3989/ic.06.001
- Valluzzi, M. R. (2006). On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation. Materials and Structures, 40(7), 723–743. doi:10.1617/s11527-006-9188-7

En general, este tipo de pruebas siempre están aplicadas en zonas puntuales de la estructura y ayudan a caracterizar propiedades y/o lesiones de ámbito local pero no ofrecen datos sobre la estabilidad del conjunto. Últimamente están ganando aceptación otros métodos alternativos, que pueden ser aplicados a la totalidad de la estructura (*global NDD methods*)¹

Por otra parte, el estado tensional de este tipo estructural es relativamente bajo, por lo que el conocimiento de la resistencia del material no es, a mi entender, el objetivo prioritario.

Además de esto, es importante conocer el grado de “monolitismo” del conjunto. Esta ha sido la principal conclusión de la mayor parte de trabajos relacionados con el diseño y diagnóstico de

1 Choi, S., Park, S., & Stubbs, N. (2005). Nondestructive damage detection in structures using changes in compliance. International Journal of Solids and Structures, 42(15), 4494–4513. doi:10.1016/j.ijsolstr.2004.12.017, pag. 4495

estructuras de obra de fábrica, de la que citamos a continuación un pequeño resumen:

- Cobreros Vime, M. A., & Escrig Pallarés, F. (2004). Análisis de estructuras de obra de fábrica (Vol. 11). Sevilla: Universidad de Sevilla, Grupo de Investigación de Tecnología Arquitectónica.
- Cobreros Vime, M. A. (1997). La obra de fábrica en los edificios civiles del Renacimiento (Vol. 5). Sevilla: Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Heyman, J., & Huerta Fernández, S. (1995). Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica :colección de ensayos. Textos sobre la Teoría e Historia de las Construcciones (Vol. 2a /a carg). Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Centro de Publicaciones etc.
- Heyman, J., López Manzanares, G. M., & Huerta Fernández, S. (2001). La ciencia de las estructuras. Textos sobre teoría e historia de las construcciones. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, J., López Manzanares, G. M., Huerta Fernández, S., Urbanismo, C. de E. H. de O. P. y, Públicas, C. de E. y E. de O., & Herrera, I. J. de. (1999). El esqueleto de piedra :mecánica de la arquitectura de fábrica. Textos sobre teoría e historia de las construcciones (Vol. 1 reimp). Madrid: Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Publicas etc.
- Huerta Fernández, S. (2004). Arcos, bóvedas y cúpulas :geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Textos sobre Teoría e Historia de las Construcciones. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Mañá i Reixach, F., & Tarragona, C. d'Aparelladors i A. T. de. (2003). La seguridad en las estructuras de fábrica. Manuales profesionales (Vol. 5). Tarragona: Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Tarragona.
- Mas-Guindal Lafarga, A. J. (2010). Las grietas en las estructuras de fábrica. Un procedimiento para evaluar la forma de trabajo de éstas. Informes de La Construcción, 48(446), 39–49. doi:10.3989/ic.1996.v48.i446.984
- Mas-Guindal Lafarga, A. J. (2011). Mecánica de las estructuras antiguas :o cuando las estructuras no se calculaban. Arquitectura y tecnología. Madrid: Munillalería.
- Serrano Alcuía, F., & Edificación, F. E. de la. (2005). Patología de la edificación : el lenguaje de las grietas (Vol. 3). Madrid: Fundación Escuela de la Edificación.
- Valluzzi, M. R. (2006). On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation. Materials and Structures, 40(7), 723–743. doi:10.1617/s11527-006-9188-7

Actualmente se está avanzando en el uso de técnicas dinámicas en el diagnóstico de estructuras, pero, debido a la complejidad y al costo de estos estudios, en el marco de los edificios con estructura de obra de fábrica sólo se están utilizando en edificios monumentales.

2.3.2 Reconocimiento dinámico de las estructuras

El análisis de sistemas estructurales ha experimentado un gran avance en los últimos años, y aunque sigue en desarrollo, su empleo en algunos sectores industriales se ha extendido ampliamente. Son técnicas habituales en diseño mecánico y aeronáutico, y su uso se ha normalizado y simplificado de tal manera, que algunas de ellas son comunes incluso en talleres de reparación de automóviles. En este apartado se realizará un rápido barrido de las técnicas actuales sin profundizar en ellas, ya que no son el objeto de esta tesis doctoral.

Como primera aproximación, podemos distinguir tres tipos de ensayos dinámicos²:

- a) Ensayos destinados a comprobar el comportamiento de la estructura ante unos niveles de vibración cercanos a los límites de diseño. Son ensayos del tipo *pasa o no pasa*.
- b) Ensayos destinados a determinar el nivel de vibración de respuesta que experimenta la estructura en condiciones reales de servicio. Posibilitan mejorar la calidad de la estimación de los datos de diseño.
- c) Ensayos que permiten obtener, además de los niveles máximos de respuesta, los parámetros principales que caracterizan el comportamiento dinámico: las formas modales, sus frecuencias, amortiguamientos modales, rigidezes, etc. De esta forma puede construir un modelo matemático del comportamiento de la estructura. Dentro de este tipo, se incluyen los ensayos modales.

En adelante nos centraremos en los ensayos modales, cuyo proceso de ejecución podemos sistematizarlo de la siguiente manera³:

- 1) Planificación de la campaña
- 2) Realización de ensayos
- 3) Análisis de los datos
- 4) Creación del modelo

Estas técnicas permiten comprobar el deterioro de una estructura mediante la comparación entre las propiedades dinámicas teóricas que debería tener la estructura, que pueden obtenerse con modelos numéricos mediante elementos finitos, y las determinaciones experimentales obtenidas mediante ensayos dinámicos.

De la comparación de los resultados del modelo analítico y de la campaña experimental podemos extraer conclusiones acerca de las posibles lesiones de la estructura.

El progreso en este campo ha venido de la mano de los avances en dos ámbitos diferenciados: la fabricación de dispositivos electrónicos, por un lado, y las teorías de tratamiento de señales y de identificación de sistemas dinámicos, por otro.

2 Ewins, D. J. (2000). Basics and state-of-the-art of modal testing. *Sadhana*, 25(June), 207–220. doi:10.1007/BF02703540

3 Ewins, D. J, op.cit., 2000, pag. 210

2.3.2.1 Realización de los ensayos

El esquema general de la cadena de ensayo dinámico puede ser el siguiente (Fig 2–1)

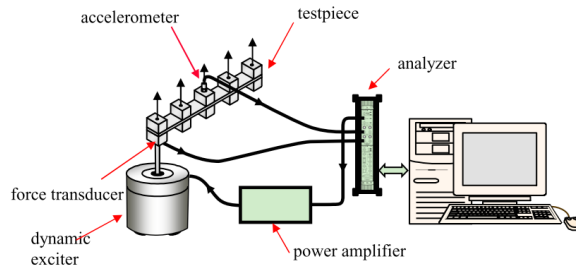


Fig 3–1: Esquema típico de un ensayo dinámico.

Imagen obtenida en <http://www.bksv.es/>



Fig 3–2: Martillo para ensayo dinámico.

Imagen tomada durante un ensayo de vibración vertical de un forjado.

Obtenida en http://www.steelconstruction.info/Floor_vibrations



Fig 3–3: Excitador dinámico

Excitador de bajo rango de fuerza, empleado en componentes mecánicos o circuitos electrónicos.

Imagen obtenida en <http://www.bksv.es>

La correcta elección de los elementos de cada uno de los eslabones de la cadena es fundamental para la adecuada caracterización del parámetro que estamos buscando.

Constituyen esta cadena:

- Dispositivos de excitación + amplificadores
- Transductores de entrada
- Transductores de respuesta
- Equipo para filtrado y amplificación analógica de la señal
- Conversor analógico digital
- Analizador

Si podemos controlar la acción de entrada estaremos realizando un análisis modal experimental (EMA) o técnica de identificación modal *Input-Output*. Esta técnica es habitual en ingeniería mecánica y aeronáutica.

En estructuras de pequeño tamaño como las estudiadas en ingeniería mecánica, se utilizan martillos (ver Fig 2–2) y excitadores electromecánicos (ver Fig 2–3). En estructuras de tipo medio, como edificios de tamaño pequeño, aún podemos inducir la señal mediante un martillo o un excitador, aunque debido al tamaño de estos elementos empieza a ser un proceso complejo (ver Fig 2–9).

En general, el ensayo dinámico más básico consiste en estimar la función de respuesta en rango de frecuencias (FRF) en varios puntos de la estructura⁴. El FRF, relaciona la acción actuante sobre la estructura con la respuesta de la misma y se define como la transformada de fourier de la acción actuante dividida por la transformada de fourier de la respuesta.

Fig 3–4: Acelerómetros montado bajo un puente

Se aprecian tres acelerómetros, dos en el apoyo y uno en la viga.

Imagen obtenida en <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-13804>



4 Cunha, Á., & Caetano, E. (2006). Experimental modal analysis of civil engineering structures. *Sound and Vibration*, (June), 12–20. doi:10.1007/978-1-4020-6239-1_299



Fig 3-5: Conjunto de acelerómetros montado bajo un puente.

Se aprecian tres acelerómetros uniaxiales dispuestos formando un triedro.

Imagen obtenida en <http://www.fib-ersensing.com/market/civil/view/shm-of-concrete-bridge>



Fig 3-6: Acelerómetro montado bajo un puente

Imagen obtenida en <http://www.microstrain.com>

La respuesta de la estructura se obtiene en la mayoría de los casos mediante transductores de aceleración o acelerómetros (Fig 2-4 a Fig 2-6). Existen varios tipos y deberá escogerse el modelo según el rango de frecuencias y la intensidad de la vibración esperada. Pueden ser de varios tipos⁵:

- Piezoeléctricos
- Piezoresistivos
- Capacitivos
- Servoacelerómetros o de fuerza balanceada

En (Rodrigues, 2004)⁶ podemos encontrar un resumen de las características de muchos de los modelos actuales.

5 Rodrigues, J. (2004). Identificação Modal Estocástica Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil. Engineering Faculty of University of Porto, Portugal, pag. 66

6 Rodrigues, J. op. cit., 2004, pag. 66

Fig 3-7: Acondicionador de señal.
Con batería incorporada, para acelerómetros piezoelectricos.

Imagen obtenida en <http://www.bksv.es/>



Fig 3-8: Módulos de conversión analógico-digital (DAQ)
En una configuración típica en bastidor.

Imagen obtenida en <http://www.bksv.es/>



Además de los acelerómetros se están usando mediciones laser, velocimetría laser-doppler, interferometría de microondas, extensómetros, GPS...

Estos dispositivos al vibrar generan una corriente eléctrica que debe ser filtrada y amplificada para su posterior análisis. Se emplean para ello equipos de pretratamiento de la señal analógica (ver Fig 2-7). Algunos modelos de acelerómetros incluyen esta etapa en su electrónica, en otros se necesita un equipo externo.

2.3.2.2 Análisis de los datos

Posteriormente, la señal analógica deberá ser digitalizada para su tratamiento informático. Esto se realiza con conversor analógico-digital (ver Fig 2-8), que puede ser un equipo autónomo con memoria para grabar el registro de datos, o una tarjeta que se incorpora a un PC.



Fig 3–9: Excitadores servo-hidráulico usados en las pruebas de vibración forzada en el Tatara Bridge. Imagen obtenida en Cunha, Á., & Caetano, E, *op.cit.*, 2006.

Por último, en el ordenador se analizan los datos con ayuda del software pertinente, para obtener los parámetros dinámicos de la estructura.

Como se ha comentado anteriormente, si la excitación es conocida y caracterizada en el tiempo, podremos realizar un análisis determinístico mediante una serie de técnicas matemáticas. Dichas técnicas pueden ser agrupadas de forma resumida en técnicas de análisis en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo.

Así, en el dominio de la frecuencia, podemos emplear métodos más o menos simples, como el método de selección de picos (peak piking), el de ajuste de curvas FRF⁷, el de ajuste circular, o el método inverso; o métodos más avanzados, como el *Rational Fraction Polynomial* (RFP), el *Complex Exponential Frequency Domain* (CEFD) o el *Polyreference Frequency Domain* (PRFD).

Por otra parte, en el dominio del tiempo, podemos usar métodos indirectos como el *Complex Exponential* (CE), *Least-Squares Complex Exponential* (LSCE), *Polyreference Complex Exponential* (PRCE), *Ibrahim Time Domain* (ITD), *Eigensystem Realization Algorithm* (ERA), o métodos directos como el *Auto Regressive Moving Average* (ARMA)⁸.

Cuando se quiere estudiar mediante alguno de estos métodos estructuras de mayor tamaño, como grandes edificios o estructuras civiles como puentes o presas, es necesaria la utilización de potentes excitadores hidráulicos (ver Fig 2–9).

Por ello, en estos casos suele recurrirse a un análisis probabilístico, basado en la vibración de la estructuras ante acciones ambientales, tales como el tráfico, el viento, etc. A la fuente de excitación se le supone las características de un *ruido blanco*, con un rango de frecuencias amplio.

7 Davis, D. B. (2008, September 11). Finite Element Modeling for Prediction of Low Frequency Floor Vibrations Due to Walking. Retrieved from <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08122008-202926>

8 Cunha, Á., & Caetano, E. (2006). Experimental modal analysis of civil engineering structures. *Sound and Vibration*, (June), 12–20. doi:10.1007/978-1-4020-6239-1_299

El problema se reduce a encontrar un rango de resultados de tipo estocástico que satisfaga las condiciones de los parámetros dinámicos.

A este tipo de análisis se les llama *Output Only* y, como los anteriores, también pueden resolverse matemáticamente en el dominio de la frecuencia, o en el dominio del tiempo.

En el dominio de la frecuencia podemos emplear técnicas de análisis OMA⁹ (operational modal analysis), como pueden ser los métodos *peak picking*¹⁰ (PP), *Averaged Normalized Power Spectral Densities*¹¹¹² (ANPSD), FDD (Frequency Domain Decomposition), EFDD¹³, RD-PP, RD-FDD, basadas todas ellas en PSD y descomposición en valores singulares (SVD). o las modernas técnicas Poly-MAX.

En el dominio del tiempo, podemos utilizar métodos directos, como el ARMAV, u otros basados en la estimación de la función de correlación por ajuste mediante mínimos cuadrados y descomposición en autovectores, como pueden ser las técnicas ITD, MRITD, LSCE, PRCE, o Stochastic Subspace Identification (SSI-COV).

En los últimos años se están desarrollando nuevos métodos de análisis, como los basados en redes neurales¹⁴ y algoritmos genéticos¹⁵, en wavelets¹⁶¹⁷, en teoría del caos¹⁸ o en aproximaciones multi-paradigma¹⁹.

-
- 9 Brincker, R., & Kirkegaard, P. H. (2010). Special issue on Operational Modal Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1209–1212. doi:10.1016/j.ymssp.2010.03.005
 - 10 Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2012). Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. In Proc. of the 18th International Modal Analysis Conference. San Antonio, TX. Retrieved from ftp://77.243.49.20/Download/Literature/Papers/2000/2000_2.pdf
 - 11 Felber, A. J. (1993). Development of a hybrid bridge evaluation system. University of British Columbia, Canada.
 - 12 Rodrigues, J. (2004). Identificação Modal Estocástica Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil. Engineering Faculty of University of Porto, Portugal. Retrieved from http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11964/2/Texto integral.pdf
 - 13 Jacobsen, N., Andersen, P., & Brincker, R. (2008). Applications of Frequency Domain Curve-fitting in EFDD Technique. Proceedings IMAC XXVI Retrieved from http://www.svibs.com/solutions/literature/2008_2.pdf
 - 14 Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Los Alamos, New Mexico 87545. doi:10.2172/249299
 - 15 Liu, W., Gao, W., Sun, Y., & Xu, M. (2008). Optimal sensor placement for spatial lattice structure based on genetic algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, 317(1-2), 175–189. doi:10.1016/j.jsv.2008.03.026
 - 16 Panda, M. N., Mosher, C. C., & Chopra, A. K. (2000). Application of wavelet transforms to reservoir-data analysis and scaling. *SPE Journal*
 - 17 Rodríguez Matienzo, J. (2008). Detección de la presencia de grietas cerradas en elementos tipo viga mediante la transformada wavelet. *Ingeniería Mecánica*, 1, 41–47[13] en su mayor\ u00eda visuales, pero que requieren el acceso directo a zonas del sistema y pueden ser poco pr\ u00e1cticos cuando los vol\ u00fmenes de la estructura son grandes
 - 18 Sakamoto, S., & Ghanem, R. (2002). Polynomial Chaos Decomposition for the Simulation of Non-Gaussian Non-stationary Stochastic Processes. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(2), 190–201. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:2(190)
 - 19 Sirca, G. F., & Adeli, H. (2012). System identification in structural engineering. *Scientia Iranica*, 19(6), 1355–1364. doi:10.1016/j.scient.2012.09.002
-

2.3.2.3 Aplicaciones

En el ámbito de la edificación y las obras públicas esta tecnología se está utilizando principalmente en los siguientes campos:

- a) Análisis del daño
- b) Monitorización de la integridad estructural o SHM (Structural Health Monitoring)
- c) Actualización dinámica (Model Updating)

En el caso del análisis del daño se emplean un conjunto de técnicas destinadas a localizar lesiones en la estructura mediante análisis de los cambios en las frecuencias naturales. Destacan entre las técnicas más utilizadas^{20,21}:

- El método *coordinate modal assurance criterion* (COMAC)
- *Parameter Method* (PM)
- *Mode Shape Curvature Method* (MSCM)
- *Damage Index Method* (DIM)
- *Sum of all Curvature Errors method* (SCE)
- *FE Model Updating method* (FEMU)

SHM o *Structural Health Monitoring* es una vía de estudio que se está ampliando en los últimos años. En ella, el equipo de captación dinámica se deja permanentemente en la estructura, monitorizando su funcionamiento y verificando que no se producen cambios inesperados.

La actualización dinámica estudia la forma de reducir el error en los modelos de elementos finitos, mediante comparación entre los resultados dinámicos de estos modelos y los obtenidos en ensayos sobre estructuras reales.

Actualmente, en el campo de la ingeniería civil, estos métodos se están empleando en puentes^{22,23}, presas²⁴ y grandes edificios y monumentos²⁵.

20 Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Los Alamos, New Mexico 87545. doi:10.2172/249299

21 Lourenço, P. B., Ramos, L. F., De Roeck, G., & Campos-Costa, A. (2008). Damage identification in masonry structures with vibration measurements. In E. Fodde (Ed.), *Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance*. Proceedings of the VI International Conference on Structural Analysis of Historic Construction, SAHC08 (pp. 311–319). Bath, United Kingdom: CRC Press. doi:10.1201/9781439828229.ch35

22 Jiménez-Alonso, J., & Saez Pérez, A. (2012). Application of the operational modal analysis and modal updating methods for the characterization of the longitudinal modulus of an ancient reinforced concrete truss bridge in Almería (Spain). In F. Biondini & D. M. Frangopol (Eds.), *Sixth International IABMAS Conference* (pp. 2682–2689). Stresa, Lake Maggiore, Italy: CRC Press 2012. doi:10.1201/b12352-411

23 Reynders, E., Teughels, A., & De Roeck, G. (2010). Finite element model updating and structural damage identification using OMAX data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1306–1323. doi:10.1016/j.ymssp.2010.03.014

24 Brownjohn, J. M. W. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 365(1851), 589–622. doi:10.1098/rsta.2006.1925

25 Compán Cardiel, V., Pachón, P., Cámara Pérez, M., & Sáez Pérez, A. (2015). Model updating of a historical building by using ambient vibration tests. Chapel of the Würzburg Residence (Germany). In *CMMoST 2015. International Conference on Mechanical Models in Structural Engineering* (pp. 361–372). Sevilla. España.

2.3.3 Grupos de investigación trabajando en líneas afines

Nacionales

- Universidad de Granada. Mecánica de sólidos y estructuras. TEP-167
Este grupo de investigación, con el Prof. Rafael Gallego Sevilla como responsable, trabaja en el proyecto “Monitorización estructural predictiva en puentes ferroviarios de alta velocidad”, financiado por la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia. Junta de Andalucía.
- Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Los profesores Rosángel Moreno González y Jesús Miguel Bairan García, imparten estudios de doctorado dentro del programa ‘Enginyeria Sísmica i Dinàmica Estructural’, y cuentan con publicaciones relacionadas con dicha temática.
- Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja” (ICCET). Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica. Responsable: Víctor Ramón Velasco Rodríguez.

Extranjeros

- Universidad de Minho (Guimaraes, Portugal). Departamento de Ingeniería Civil.
El grupo “Masonry and Historical Constructions” dirigido por el Prof. Paulo B. Lourenço, trabaja en construcciones históricas de obra de fábrica a todos los niveles, incluyendo inspección, modelado, evaluación y refuerzo. Combina investigación y consultoría especializada.
- Universidad de Oporto (Italia). Facultad de Ingeniería (FEUP). Departamento de Ingeniería Civil.
El Laboratory of Vibration and Structural Monitoring (ViBest), dirigido por el Prof. Álvaro Cunha, proporciona soporte a la realización de ensayos experimentales en el campo de dinámica estructural, particularmente en el análisis, identificación, monitorización y control del comportamiento estructural bajo diferentes cargas de tipo dinámico.
- Universidad de Aveiro (Portugal). Departamento de Ingeniería Civil.
Este departamento cuenta entre sus miembros con los profesores Aníbal Guimaraes Da Costa o Humberto Salazar Amorim Varum, especializados en campos de ingeniería sísmica y rehabilitación de construcciones.
- Politecnico di Milano (Italia). Dipartimento di Ingegneria Strutturale.
Las profesoras Luigia Binda y Antonella Saisi desarrollan, desde hace años, líneas de investigación relacionadas con la restauración de estructuras de obra de fábrica. La Profesora Luigia Binda ha sido presidente de dos de los comités de RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures), TC_MMM y TC_COM.
- Politécnico de Torino (Italia). Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica.
El profesor Alberto Carpinteri, es Presidente del Consejo Internacional de Fractura ICF (2009-2013), Presidente de la Sociedad de Integridad Estructural Europea ESIS (2002-2006), y colabora con otros miembros de su departamento en estas líneas de investigación como son los profesores Stefano Invernizzi y Giuseppe Lacidogna.

- Universidad de La Sapienza, Roma (Italia). FenDiS (Phenomena of Structural Dynamics) Proyecto de investigación fundado por MURST, el Ministerio para la Investigación Científica, desde 1997.
FenDiS ha sido desarrollado por un grupo de investigadores pertenecientes a diferentes universidades italianas y coordinados por el profesor Fabrizio Vestroni de La Sapienza.
- Structural and Geotechnical Dynamics Lab StreGa (Italia).
Instituto de investigación que trabaja en el campo de la evaluación sísmica de estructuras civiles e infraestructuras, desde la evaluación de la vulnerabilidad hasta SHM. En particular, sus actividades se centran en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes (estructuras históricas, patrimonio,...) e infraestructuras (puentes, tanques, instalaciones industriales,...), e identificación modal de tipo output-only y monitorización de estructuras civiles.
- Katholieke Universiteit Leuven (Bélgica). Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
El Prof. Guido De Roeck dirige la Sección “Structural Mechanics”, donde se investiga en temas relacionados con el Análisis Dinámico (Dynamic system identification, Damage detection by vibration monitoring,...)

Son pocos los estudios encontrados orientados al ámbito de la edificación doméstica con estructura de obra de fábrica, una tipología estructural muy común y con un amplio parque edificado en nuestro país.

2.3.4 Dinámica de las estructuras de obra de fábrica.

2.3.4.1 El periodo fundamental. Criterios normativos

Se define como periodo fundamental de una estructura como el periodo asociado al primer modo de vibración. También puede definirse como la solución con periodo más alto, de las posibles soluciones a la ecuación general de la dinámica:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t)$$

Suele considerarse que dicho periodo tiene gran importancia por llevar asociado la mayor parte de la energía del sistema.

Las distintas normas sísmicas internacionales proponen métodos simplificados de estimación del periodo fundamental de vibración del edificio, para el cálculo sísmico por el método de la fuerza estática equivalente.

La norma habitual de considerar el modo con el periodo más alto como el más importante no siempre es correcta. En el caso de las estructuras de obra de fábrica tradicional, con forjados de madera, el sistema vertical (los muros) puede tener un periodo más alto que los elementos de

madera. En caso de acción dinámica horizontal, el periodo importante puede no ser el más bajo (ligado a forjado) sino el que movilice más masa en la dirección de la acción.

La norma chilena NCh433 en lugar de utilizar la definición clásica de *primer modo fundamental*, como la mayor parte de las normas internacionales, utiliza esa otra:

“el periodo del modo con mayor masa traslacional equivalente en la dirección de análisis”

Criterio mucho mas realista.

La forma habitual de obtención del periodo sigue alguna expresión derivada de la fórmula de Rayleigh²⁶, suele tener la forma: $T = C \cdot H^\alpha$

Donde C y α son coeficientes obtenidos experimentalmente.

Las primeras expresiones de este tipo podemos encontrarlas en las recomendaciones de la ATC 3-06 de 1978, donde aparece la fórmula $T = C \cdot H^{0.75}$

En dicha publicación, el valor de C fue estimado con los datos obtenidos durante el terremoto de San Fernando de 1971.

En otros reglamentos se utilizan coeficientes parecidos. En la Tabla 2–1 se exponen las fórmulas expuestas en los reglamentos: NCSE²⁷, Eurocódigo 8²⁸, ATC 3-06²⁹, NZSEE³⁰, NEHRP (FEMA 450)³¹, CIRSOC 102³², UBC³³, ASCE/SEI 7-10³⁴ y E.030³⁵. En la tabla 1 se resume la formulación empleada por algunas de las principales normas internacionales.

26 Masi, A., Mucciarelli, M., Gallipoli, M. R., & Vona, M. (2006). Estimation of the period of vibration of existing RC building types based on experimental data and numerical results. In M. Mucciarelli, M. Herak, & C. John (Eds.), *Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data* (pp. 207–225). Dubrovnik, Croatia: Springer.

27 Ministerio de Fomento. (2002). NCSE-02. Norma de Construcción Sismorresistente parte general y Edificación.

28 Aenor. (2011). Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación.

29 Applied Technology Council. (1978). ATC3-06. NBS special publication 510. Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings. Washington D.C.: United States. Government Printing Office.[24]

30 New Zealand Society for Earthquake Engineering. (2006). NZSEE 2006. Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes. Recommendations of a NZSEE Study Group on Earthquake Risk Buildings.

31 Building Seismic Safety Council. (2006). NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450). Washington, D.C.[26]

32 Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. (2005). Reglamento CIRSOC 102-2005. Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones. INTI Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

33 International Code Council. (1997). UBC 1997 Vol 2 - Structural Engineering Design Provisions. International Code Council.

34 ASCE (American Society of Civil Engineers). (1978). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-10). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.[29]

35 SENCICO. (2003). NTE E.030 de diseño sismorresistente de edificios del Perú. Lima, Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Evidentemente, en este tipo de expresiones, el resultado no está influenciado por la longitud del edificio, el número de muros o su espesor. Se trata de una fórmula muy simple con resultados estadísticos medios.

En algunos códigos internacionales, además de la fórmula simplificada expuesta anteriormente, aparecen fórmulas más precisas en las que interviene la longitud de los muros, el número de muros o su espesor. Como puede comprobarse en la Tabla 2–1, los resultados son muy distintos empleando las fórmulas simplificadas o las específicas.

Tabla 3–1: Fórmula del periodo fundamental aproximado, para edificios con estructura de fábrica de ladrillo, según distintas normas internacionales.

Norma	Artículo	Fórmula simplificada		Fórmula extendida	
		Fórmula	Parámetros	Fórmula	Parámetros
NCSE-02	3.7.2.2	$T_F := 0,06 \cdot H \cdot \frac{\sqrt{\frac{H}{(2 \cdot L + H)}}}{\sqrt{L}}$			
Eurocódigo 8	4.3.3.2.2	$T_F := C_t \cdot (h_n)^{\frac{3}{4}}$	$C_t=0,05$	$T_F := C_t \cdot (h_n)^{\frac{3}{4}}$	$C_t := \frac{0,075}{\sqrt{A_c}}$ $A_c = \Sigma \left[A_i \cdot \left(0,2 + (l_{wi} / H)^2 \right) \right]$
ATC 3-06	4.2.2	$T_F := \frac{0,05 \cdot h_n}{\sqrt{L}}$			
NZSEE	App. 4E.8.1	$T_F := 1,25 \cdot k_t \cdot h_n^{0,75}$	$k_t=0,05$		
NEHRP (FEMA 450)	5.2.2	$T_F := C_t \cdot (h_n)^{\frac{3}{4}}$	$C_t=0,0488$	$T_F := \frac{0,0062}{\sqrt{C_w}} \cdot h_n$	$C_w = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_n}{h_i} \right)^2 \frac{A_i}{\left[1 + 0,83 \left(\frac{h_i}{L_i} \right)^2 \right]}$
CIRSOC 102	Anexo III.1.5	$T_F := 0,06 \cdot \frac{h_n}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{\frac{h_n}{2 \cdot L + h_n}}$	$k_t=0,05$		
UBC	1630.2.1	$T_F := C_t \cdot (h_n)^{\frac{3}{4}}$	$C_t=0,0488$		
ASCE/SEI 7-10	12.8.2	$T_F := C_t \cdot (h_n)^{\frac{3}{4}}$	$C_t=0,0488$	$T_F := \frac{0,0062}{\sqrt{C_w}} \cdot h_n$	$C_w = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_n}{h_i} \right)^2 \frac{A_i}{\left[1 + 0,83 \left(\frac{h_i}{L_i} \right)^2 \right]}$
E.030 (Perú)	17.2	$T_F := \frac{h_n}{C_t}$	$C_t=60$		

En la normativa sísmica española PGS-1 de 1968, aparece una fórmula que se encuentra a caballo entre la expresión simplificada que se usa en otros países y la fórmula específica.

$$T = 0.06 \cdot \frac{H}{\sqrt{L}} \cdot \frac{H}{2L + h}$$

Donde:

- H es la altura del edificio en metros
- L es la dimensión en planta, tomada en la dirección de la vibración cuyo efecto se desea estudiar, en metro
- h es la altura de cada piso

Dicha fórmula fue modificada en la normativa siguiente P.D.S.-1 de 1974, eliminando el parámetro de altura de piso:

Esta expresión se ha mantenido en las versiones siguientes hasta el presente, y ha sido adoptada igualmente por otros reglamentos, como el CIRSOC.

Como puede observarse en la Tabla 2–2, los resultados de esta fórmula, se encuentran a medio camino entre los de las fórmulas simplificadas y los de las fórmulas específicas.

Tabla 3–2: Resultados para un edificio de dos planta de altura, con dimensión en planta de 13*14 m y muros de carga y de atado de 60 cm y de 29 cm de espesor respectivamente (equivalente al Tipo 1, variante 2).

Norma	Artículo	Fórmula simplificada		Fórmula extendida	
		T (s)	F (Hz)	T (s)	F (Hz)
NCSE-02	3.7.2.2	0,0502	19,92		
Eurocódigo 8	4.3.3.2.2	0,2152	4,65	0,0327	30,58
ATC 3-06	4.2.2	0,3069	3,26		
NZSEE	App. 4E.8.1	0,269	3,72		
NEHRP (FEMA 450)	5.2.2	0,21	4,76	0,0138	72,46
CIRSOC 102	Anexo III.1.5	0,0502	19,92		
UBC	1630.2.1	0,21	4,76		
ASCE/SEI 7-10	12.8.2	0,21	4,76	0,0138	72,46
E.030 (Perú)	17.2	0,1167	8,57		

2.3.4.2 Principales referencias en la investigación dinámica en edificios de obra de fábrica

En la tabla siguiente se enumeran algunos de los estudios realizados sobre edificación monumental con estructura de obra de fábrica.

Referencia	Edificio	Año	Tipo de estudio
Pachón, P., Rodríguez-Mayorga, E., Cobo Escamilla, A., & Yanes, E. (2015). Control de la intervención estructural sobre el área del Teatro Romano de Cádiz. <i>Informes de la Construcción</i> , 66(Extra-1), m003. http://doi.org/10.3989/ic.13.086	Teatro Romano de Cádiz. España	2015	Control de intervención
Calderón, F., Palazzo, G., Roldan, V., Deraemaeker, A., & Tondreau, G. (2015). Changes of dynamic properties in an ancient masonry building due to environmental conditions. In <i>IOMAC'15 6th International Operational Modal Analysis Conference</i> . Gijón, Spain.	Museo Emiliano Giñazú. Argentina	2015	Monitorización
Compán Cardiel, V., Pachón, P., Cámara Pérez, M., & Sáez Pérez, A. (2015). Model updating of a historical building by using ambient vibration tests . Chapel of the Würzburg Residence (Germany). In <i>CMMoST 2015. International Conference on Mechanical Models in Structural Engineering</i> (pp. 361–372). Sevilla. España.	Capilla de la residencia Würzburg	2015	Model updating
Dal Cin, A., & Russo, S. (2014). Influence of the annex on seismic behavior of historic churches. <i>Engineering Failure Analysis</i> , 45, 300–313.	Iglesia del Gesù, Mirandola, Italia	2014	Caracterización. Influencia de la manzana
Russo, S. (2014). Using Experimental Dynamic Modal Analysis in Assessing Structural Integrity in Historic Buildings. <i>The Open Construction and Building Technology Journal</i> , 8, 357–368.	Varios	2014	
Bartoli, G., Betti, M., & Giordano, S. (2013). In situ static and dynamic investigations on the “Torre Grossa” masonry tower. <i>Engineering Structures</i> , 52(null), 718–733.	Torre Grossa	2013	San Gimignano, Italia
Osmancikli, G., Uçak, Ş., Turan, F. N., Türker, T., & Bayraktar, A. (2012). Investigation of restoration effects on the dynamic characteristics of the Hagia Sophia bell-tower by ambient vibration test. <i>Construction and Building Materials</i> , 29(0), 564–572.	Palazzo Ducale, Venecia, Italia	2013	Monitorización

Referencia	Edificio	Año	Tipo de estudio
Pau, A., & Vestroni, F. (2013). Vibration assessment and structural monitoring of the Basilica of Maxentius in Rome. <i>Mechanical Systems and Signal Processing</i> , 41(1-2), 454–466.	Basilica de Maxentius, Roma, Italia	2013	Caracterización
Boscato, G., dal Cin, A., Russo, S., & Sciarretta, F. (2013). SHM of Historic Damaged Churches. <i>Advanced Materials Research</i> , 838-841(JANUARY), 2071–2078.	Iglesias de San Pedro y de Sta. María Paganica, L'Aquila, Italia	2013	SHM
Gattulli, V., Antonacci, E., & Vestroni, F. (2013). Field observations and failure analysis of the Basilica S. Maria di Collemaggio after the 2009 L'Aquila earthquake. <i>Engineering Failure Analysis</i> , 34, 715–734.	Basilica S. Maria di Collemaggio, L'Aquila, Italia	2013	Análisis del daño y vulnerabilidad
Ramos, L. F., Aguilar, R., Lourenço, P. B., & Moreira, S. (2013). Dynamic structural health monitoring of Saint Torcato church. <i>Mechanical Systems and Signal Processing</i> , 35(1-2), 1–15.	Iglesia de San Torcato, Guimarães, Portugal	2013	SHM
Russo, S. (2013). On the monitoring of historic Anime Sante church damaged by earthquake in L'Aquila. <i>Structural Control and Health Monitoring</i> , (October 2012), 1226–1239.	Iglesia Anime Sante, L'Aquila, Italia	2013	SHM
Lourenço, P. B., Trujillo, A., Mendes, N., & Ramos, L. F. (2012). Seismic performance of the St. George of the Latins church: Lessons learned from studying masonry ruins. <i>Engineering Structures</i> , 40, 501–518.	Ruinas de St. George of the Latins, Famagusta, Chipre	2012	Caracterización. Pushover
Osmancikli, G., Uçak, Ş., Turan, F. N., Türker, T., & Bayraktar, A. (2012). Investigation of restoration effects on the dynamic characteristics of the Hagia Sophia bell-tower by ambient vibration test. <i>Construction and Building Materials</i> , 29(0), 564–572.	Torre del reloj de Hagia Sophia en Trabzon, Turquía.	2012	Caracterización de la intervención
Votsis, R. A., Kyriakides, N., Chrysostomou, C. Z., Tantele, E., & Demetriou, T. (2012). Ambient vibration testing of two masonry monuments in Cyprus. <i>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</i> , 43, 58–68.	Catedral de San Nicholas en Famagusta e iglesia de San Mamas en Morphou, Chipre	2012	Caracterización

Referencia	Edificio	Año	Tipo de estudio
Boscato, G., Rocchi, D., Russo, S., & Pizzolato, M. (2012). Modelling procedure for structural characterization of monumental buildings. In <i>14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering</i> . Moscow, Russia.	Santa Maria del Suffragio, L'Aquila, Italia	2012	Caracterización
D'Ambrisi, A., Mariani, V., & Mezzi, M. (2012). Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests. <i>Engineering Structures</i> , 36(0), 210–219.	Torre de Soncino, Cremona, Italia	2012	Caracterización y vulnerabilidad
Ramos, L. F., Aguilar, R., & Lourenço, P. B. (2011). Operational modal analysis of historical constructions using commercial wireless platforms. <i>Structural Health Monitoring</i> , 10(5), 511–521.	Chimenea del Paço dos Duques, Guimarães, Portugal	2011	Caracterización
Atamturktur, S., Bornn, L., & Hemez, F. (2011). Vibration characteristics of vaulted masonry monuments undergoing differential support settlement. <i>Engineering Structures</i> , 33(9), 2472–2484.	Beverley Minster, Reino Unido	2011	Caracterización
Aras, F., Krstevska, L., Altay, G., & Tashkov, L. (2011). Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace. <i>Construction and Building Materials</i> , 25(1), 81–91.	Palacio Beylerbeyi, Estambul, Turquía	2011	Caracterización y Calibración modelo FEM
Samuels, J. M. (2010). <i>Wireless Sensor Network for Monitoring of Historic Structures under Rehabilitation. ... thesis, Texas A&M</i> Texas A&M University.	Iglesia Frankford, Dallas e iglesia luterana de St Paul, Serbin. Ambas en Texas, USA Johanniskirche en Schwäbisch Gmünd, Alemania	2010	Wireless SHM
Lourenço, P. B., Ramos, L. F., De Roeck, G., & Campos-Costa, A. (2008). Damage identification in masonry structures with vibration measurements. In E. Fodde (Ed.), <i>Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance</i> . Proceedings of the VI International Conference on Structural Analysis of Historic Construction, SAHC08 (pp. 311–319). Bath, United Kingdom: CRC Press.	Torre del reloj de Mogadouro, Portugal	2008	Identificación de daños

Referencia	Edificio	Año	Tipo de estudio
Ramos, L. F. (2007). <i>Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures</i> .	Monasterio de los Jerónimos, Lisboa, Portugal	2008	Caracterización
Atamturktur, S., Pavic, A., & Reynolds, P. (2008). Sensitivity of modal parameters of historic monuments to geometric distortion. In <i>26th International Modal Analysis Conference (IMAC XXVI)</i> .	Beverley Minster, Reino Unido	2008	Caracterización
Betti, M., & Vignoli, A. (2008). Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance. <i>Engineering Structures</i> , 30(2), 352–367.	Abadia Farneta, Val di Chiana, Cortona, Italia	2008	Caracterización y Calibración modelo FEM
De Stefano, A. (2007). Structural Identification and Health Monitoring on the Historical Architectural Heritage. <i>Key Engineering Materials</i> , 347, 37–54.	Cappella della Sacra Sindone, Turin, Italia	2007	Caracterización
Gentile, C., & Saisi, A. (2007). Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. <i>Construction and Building Materials</i> , 21(6), 1311–1321.	Torre del reloj junto a la Catedral de Monza, Italia	2007	Caracterización
Taliercio, A., & Binda, L. (2007). The Basilica of San Vitale in Ravenna: Investigation on the current structural faults and their mid-term evolution. <i>Journal of Cultural Heritage</i> , 8(2), 99–118.	Basilica de San Vitale, Ravenna, Italia	2007	SHM
De Sortis, A., Antonacci, E., & Vestroni, F. (2005). Dynamic identification of a masonry building using forced vibration tests. <i>Engineering Structures</i> , 27(2), 155–165.	S. Sisto School	2005	Caracterización
Atamturktur, S., & Hemez, F. (2009). Verification and validation under uncertainty applied to finite element models of historic masonry monuments. In <i>27th SEM International Modal Analysis Conference (IMAC-XXVII)</i> . Orlando, Florida.	Washington National Cathedral, USA	2004	Calibración modelo FEM
Baptista, M. A., Mendes, P., Afilhado, A., Agostinho, L., Lagomarsino, S., & Mendes, V. L. (2004). Ambient vibration testing at N. Sra. do Carmo Church, preliminary results. In <i>Proc. of the 4th international seminar Structural Analysis of Historical Constructions</i> . Padova, Itália.	Iglesia de N. Sra. do Carmo, Lagos, Portugal	2004	Caracterización

En la tabla siguiente se enumeran algunos de los estudios realizados sobre edificación residencial con estructura de obra de fábrica.

Referencia	Edificio	Año	Tipo de estudio
Lopes, M., Meireles, H., Cattari, S., Bento, R., & Lagomarsino, S. (2014). Structural Rehabilitation of Old Buildings. In A. Costa, J. M. Guedes, & H. Varum (Eds.), <i>Structural Rehabilitation of Old Buildings</i> (Vol. 2, pp. 109–130). Berlin, Heidelberg: Springer.	Edificio "Pombalino", Lisboa, Portugal	2014	Caracterización y estudio del refuerzo
Masciotta, M. G., Lourenço, P. B., Ramos, L. F., Vasta, M., Sturm, T., & Campos-Costa, A. (2014). Spectral-based Damage Identification Technique on an Earthen Mock-up Construction tested on a Shaking Table. In 9th International Masonry Conference (p. ID1388).	Modelos de vivienda. Ensayo a escala real	2014	Identificación de daños
Oyarzo-vera, C., Ingham, J. M., & Chouw, N. (2014). Vibration-based damage identification of an unreinforced masonry house model. In EURO-DYN 2014. 9th International Conference on Structural Dynamics (pp. 2477–2484).	Modelos de vivienda. Ensayo a escala real	2014	Identificación de daños
Aguilar, R., Ramos, L. F., Torrealva, D., & Chácara, C. (2013). Experimental modal identification of an existent earthen residential building. In IOMAC'13 (Ed.), 5th International Operational Modal Analysis Conference. Guimarães - Portugal.	Hotel Comercio, Lima, Perú	2013	Caracterización
Branco, M., & Guerreiro, L. M. (2011). Seismic rehabilitation of historical masonry buildings. <i>Engineering Structures</i> , 33(5), 1626–1634.	Edificio "Gaioleiro", Lisboa, Portugal	2011	Caracterización y estudio de la intervención
Moreno-González, R., & Bairán, J. M. (2011). Análisis del comportamiento sísmico de los edificios de obra de fábrica, típicos del distrito Eixample de Barcelona. <i>Informes de La Construcción</i> , 63(524), 21–32.	Edificios del Eixample de Barcelona, España	2011	Caracterización

Referencia	Edificio	Año	Tipo de estudio
Ramos, L. F., Marques, L., Lourenço, P. B., De Roeck, G., Campos-Costa, A., & Roque, J. (2010). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies. <i>Mechanical Systems and Signal Processing</i> , 24(5), 1291–1305.	Edificio "Gaioleiro", Lisboa, Portugal	2010	Vulnerabilidad sísmica
Carrillo León, W. J. (2009). Estimación de los periodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto. <i>Ciencia E Ingeniería Neogranadina</i> , 19(1), 39–54.	Viviendas	2009	Caracterización
Bernardini, A., Valluzzi, M. R., & Modena, C. (2008). Vulnerability assessment of the historical masonry building typologies of Vittorio Veneto (NE Italy). <i>Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata</i> , 49(December), 463–483.	Edificios en Vittorio Veneto, Italia	2008	Vulnerabilidad
Vintzileou, E., Zagkotsis, A., Repapis, C., & Zeris, C. (2007). Seismic behaviour of the historical structural system of the island of Lefkada, Greece. <i>Construction and Building Materials</i> , 21(1), 225–236. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.04.002	Edificios de viviendas en la isla de Lefkada, Grecia	2007	Caracterización y control de la intervención
Cardoso, R., Bento, R., & Lopes, M. (2005). Seismic evaluation of old masonry buildings. Part I: Method description and application to a case-study. <i>Engineering Structures</i> , 27(14), 2024–2035.	Edificio "Pombalino", Lisboa, Portugal	2005	Vulnerabilidad sísmica

2.4 Formulación del problema de investigación

Todas las estructuras tienen un comportamiento dinámico propio. En el caso de las estructuras de obra de fábrica, ese comportamiento es muy sensible a los cambios que introducen las lesiones. Por tanto, en una parte importante de los edificios de obra de fábrica es factible detectar, en mayor o menor grado, esas modificaciones.

Tras algunos ensayos sobre edificios reales se detecta que una de las lesiones más habituales en la edificación doméstica con estructura de fábrica de ladrillo en la ciudad de Sevilla, afecta de manera importante a los resultados de dichos ensayos. En particular, he encontrado un gran cambio en el espectro de respuesta de la estructura.

Planteo por tanto en esta tesis doctoral, la caracterización teórica de la respuesta dinámica de este tipo de edificio, de forma que dichos datos puedan ser tomados de referencia en los futuros ensayos dinámicos a fin de estimar la existencia de lesiones.

¿Por qué centrar la investigación en la edificación doméstica sevillana con estructura de obra de fábrica?

Como he comentado antes, he detectado que un número importante de este tipo de edificios presenta una lesión característica. Además esta lesión, al parecer, hace que las características dinámicas cambien totalmente.

Centrar el problema en un tipo concreto tiene además dos ventajas: la primera, derivada de la disponibilidad y cercanía, al tratarse de un tipo edificatorio que conozco bien. La segunda es que el número de variables se reduce de forma importante.

Posteriormente podremos intentar extender la investigación a otros ámbitos.

¿Es posible reducir la campaña de ensayos dinámicos a unos pocos ensayos?

Como se ha expuesto en el punto dedicado al estado de la cuestión, hay muchas técnicas de análisis dinámico. Cada una de ellas está pensada para obtener un tipo de información, teniendo como punto de partida los datos de los ensayos, con excitación conocida o ambiental. Pero todas ellas tienen una característica común: necesitan un elevado número de puntos de ensayos.

De hecho, para algunos, un ensayo modal debe estar pensado para obtener un modelo matemático del comportamiento de la estructura, basado por completo en los datos de medición de la vibración³⁶. En este sentido, según Ewins:

*...es necesario que todos los modos relevantes de la estructura estén incluidos en el proceso de modelado...*³⁷

³⁶ Ewins, D. J, op.cit., 2000, pag. 210

³⁷ Traducción del autor

Para conseguir esto es imprescindible realizar mediciones en bastantes puntos de la estructura.

Pero en la práctica real, una campaña de ensayos de este tipo y su posterior análisis queda fuera del alcance de los propietarios de este tipo de edificios. No se suelen realizar ni tan siquiera en los casos de intervención total en el edificio. Mucho menos en los casos de peritación estructural con el edificio en uso.

Creo, e intentaré probar en esta tesis, que con unos pocos ensayos realizados en los puntos adecuados podríamos tener datos suficientes para diagnosticar una lesión.

Por supuesto, esa información no será suficiente para realizar un análisis modal completo como los mencionados anteriormente. La clave estará, remitiéndome a la referencia de Ewins, en poder capturar los “modos relevantes”: los modos que provoquen las lesiones.

¿Qué parámetros pueden influir en los resultados de un posible ensayo mediante acelerómetros?

Considero que los parámetros fundamentales que pueden influir en este tipo de ensayos son los siguientes:

- La geometría del edificio:
 - El tipo geométrico
 - Las dimensiones
- El espesor y las características de la fábrica
- El tipo de forjado
- Las conexiones del forjado con los muros
- La influencia del resto de la manzana
- Las lesiones
- El punto de realización del ensayo

¿Qué parámetros de la realidad son fácilmente discretizados en un modelo de cálculo?

De los parámetros antes enumerados, el más complejo de analizar será la influencia del resto de edificios que constituyen la manzana, debido a la variabilidad y al tiempo de computación requerido para su estudio.

¿Cuánto influye cada uno de esos parámetros en el resultado final del ensayo?

Atendiendo a la formulación de las distintas normas sísmicas internacionales, los parámetros que más afectan (suponiendo una estructura sin lesiones) son: la altura y las dimensiones en planta de los muros, es decir, la dimensión en planta del edificio.

Si atendemos a las fórmulas menos simplificadas recogidas en estas normas, también afectarán el número de muros en cada dirección y su espesor.

Al parecer, cuestiones como la distribución en planta de los muros, el tipo de forjado o los edificios contiguos tienen poca incidencia en las frecuencias principales.

Se intentará probar que parámetros son realmente más importantes y cuales se pueden despreciar del problema.

2.5 Método de investigación

El trabajo se ha estructurado en tres fases:

1ª FASE: Se llevará a cabo un estudio tipológico de la edificación doméstica de obra de fábrica, y en particular el caso concreto de edificación sevillana. El estudio se centrará en los aspectos estructurales y constructivos, y en las lesiones estructurales habituales de cada tipo. Se pretende en esta fase, definir las características del objeto de estudio, que van a ser analizadas en fases posteriores.

Esta fase debe concluir con la elaboración de un cuadro de los tipos arquitectónicos que van a ser analizados, y el rango de valores de los distintos parámetros, geométricos y mecánicos.

2ª FASE: A partir de las conclusiones de la fase anterior, se construirán los modelos informáticos de los distintos tipos a estudiar. Se comenzará por discretizar estructuras sencillas, para estudiar la influencia de los parámetros que intervienen en el problema, en los resultados modales.

A continuación, se modelarán edificios representativos de cada tipo y se obtendrán resultados dinámicos con la estructura sana y con distintas suposiciones de lesiones.

Dichos resultados se analizarán mediante gráficas PSD tratadas mediante MatLab.

3ª FASE: Se discutirán los resultados de la fase 3 y se intentará:

- sistematizar la elección de los puntos de ensayo
- resumir el rango de valores que podemos suponer “normal” para un edificio sin lesiones y qué valores podrían caracterizar una lesión del tipo estudiado.

Como expone José María Mauriño², el proceso de crecimiento de Sevilla, a diferencia de la mayoría de las ciudades europeas, no se produce desbordando la muralla, sino que se formaliza mediante un proceso continuado de densificación del tejido intramuros:

Sobre el siglo XI se modifica el trazado de la muralla y extendiéndose la ciudad hacia el norte y el oeste envolviendo huertos y arrabales extramuros con tal cantidad de terreno que hasta la segunda mitad del siglo XX no hubo necesidad de desbordar la cerca, produciéndose un proceso de densificación continuado durante más de nueve siglos.³

Tras la conquista cristiana, en la zona edificada se produce un proceso de reunificación de parcelas por la nobleza que había participado en la toma de la ciudad, formando edificios de grandes dimensiones, como la Casa de Pilatos, el Palacio de las Dueñas o el de los Pinelo⁴.

Hoy podemos encontrar signos de esta unificación del parcelario, encontrando edificios que se solapan horizontal e incluso verticalmente con sus vecinos.

El valor de un parcelario será distinto en función del propio carácter de la medianería. Si por esta entendemos aquellos elementos formalmente, y quizá constructivamente también, comunes a dos viviendas adyacentes, la geometría de ese contacto definirá aquel valor de la parcela.

Una medianera vertical, por ejemplo, implicará un valor determinado a la planta y permitirá pensar la composición de la manzana como yuxtaposición de viviendas. Una medianera mixta, vertical y horizontal, restará valor a la significación de la parcela y exigirá entender aquella como macla, intersección, etc. El lugar que la planta ha de ocupar en la concepción de la vivienda ha sido en ocasiones (Loos) una clave de la proyectación en la arquitectura moderna.⁵

Por otra parte, las órdenes religiosas se apropian de los terrenos de labor que quedaron intramuros. Se construyen conventos y monasterios, con claustros y huertos, germen de las grandes manzanas de la zona norte de la ciudad.

El apogeo de la ciudad tiene lugar durante el siglo XVI cuando, convertida en zona estratégica del comercio con América, se produce una explosión demográfica que coloniza el interior de las manzanas, antiguas huertas. Además acontece un cambio conceptual por el cual “*la arquitectura sevillana irá abandonando su introspección, para labrar fachadas y portadas a calles y plazas*”⁶.

2 J. M. Mauriño Soyo, “Sevilla: la ocupación del interior de manzana,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2008

3 Mauriño Soyo, op.cit., 2008, pag. 25

4 Mora Vicente, G. M. (2011). Ejemplos de arquitectura civil sevillana en los siglos XV y XVI. Elementos constructivos. In S. Huerta Fernández, I. J. Gil Crespo, S. García, & M. Tain (Eds.), Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Santiago de Compostela, 26 - 29 octubre 2011. Madrid, Spain: Instituto Juan de Herrera, pag. 966

5 J. R. Sierra Delgado and R. Manzano Martos, “Introducción al análisis formal de la arquitectura doméstica popular en Sevilla,” Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Sevilla, 1980.

6 Falcón Márquez, T. (2000). Tipologías constructivas de los palacios sevillanos del siglo XVI. In A. Graciani García, S. Huerta, E. Rabasa, & M. A. Tabales Rodríguez (Eds.), Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la

En el siglo XIX, con la Desamortización de Mendizábal, se liberan grandes extensiones de suelo dentro de la ciudad histórica. Suelo que se ocupa mediante casas-patio en las crujías perimetrales de las manzanas y con vivienda colectiva para las clases más humildes (corrales), en el interior de las mismas.

La diferenciación radical entre la celda básica o doble celda como unidad residencial del interior de la manzana y casa-patio conformadora del perímetro de se neutraliza progresivamente apareciendo nuevas tipologías, fusión de las dos anteriores produciéndose incluso transferencias de tipologías propias de polígonos residenciales y que se incorporan a los mecanismos ocupación causando la metamorfosis del esquema original y la complejización del tejido de la ciudad, reflejo de las transformaciones socioeconómicas. Se compone un collage con fragmentos de ambas caras de la manzana a los que se añaden elementos ajenos a la cultura arquitectónica de la ciudad para conformar esta nueva y sugerente realidad.⁷

Surgen, además, otras formas de colonización: la colmatación⁸, el pasaje, etc.

3.2 Catálogo de tipos edificatorios

Según describe Hazañas y la Rúa⁹ en su conferencia sobre la casa sevillana, se pueden distinguir 5 tipos de edificios:

- 1) Palacios reales y de los próceres o magnates
- 2) Casas menos suntuosas y extensas, pero también ricas, pertenecientes a los caballeros y comerciantes enriquecidos
- 3) Casas más sencillas y modestas, de más reducido espacio, pero en ocasiones amplias y cómodas, de la clase media
- 4) Viviendas de la clase humilde, la casa o corral de vecinos
- 5) Tiendas y alcaicerías

El tercer grupo es el más común y tal como describe el mismo autor:

Entran en este grupo otras casas más pequeñas y modestas que las citadas, pero que como construcciones repiten, en menor escala, el tipo de aquellas y que en ocasiones fueron habitadas por dos familias, una en cada piso, o por más, dando origen a lo que se llamó casa de partidos en que la separación de vecinos no alcanzaba al patio, azotea y otras dependencias de que todos disfrutaban por igual.¹⁰

Construcción. Sevilla 26-28 Octubre 2000 (pp. 279–284). Madrid, Spain: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla, pag. 282

7 Mauriño Soyo, *ibid*, pag. 25

8 Sierra Delgado, J. R. (1985). El destino de la arquitectura vieja Sevillana. A&V Monografías, (4), 24–31, pag.29

9 J. Hazañas y la Rúa and F. Hohenleiter, La casa sevillana. Sevilla : Padilla Libros, 1989

10 J. Hazañas y la Rúa, *ibid*, pag. 12

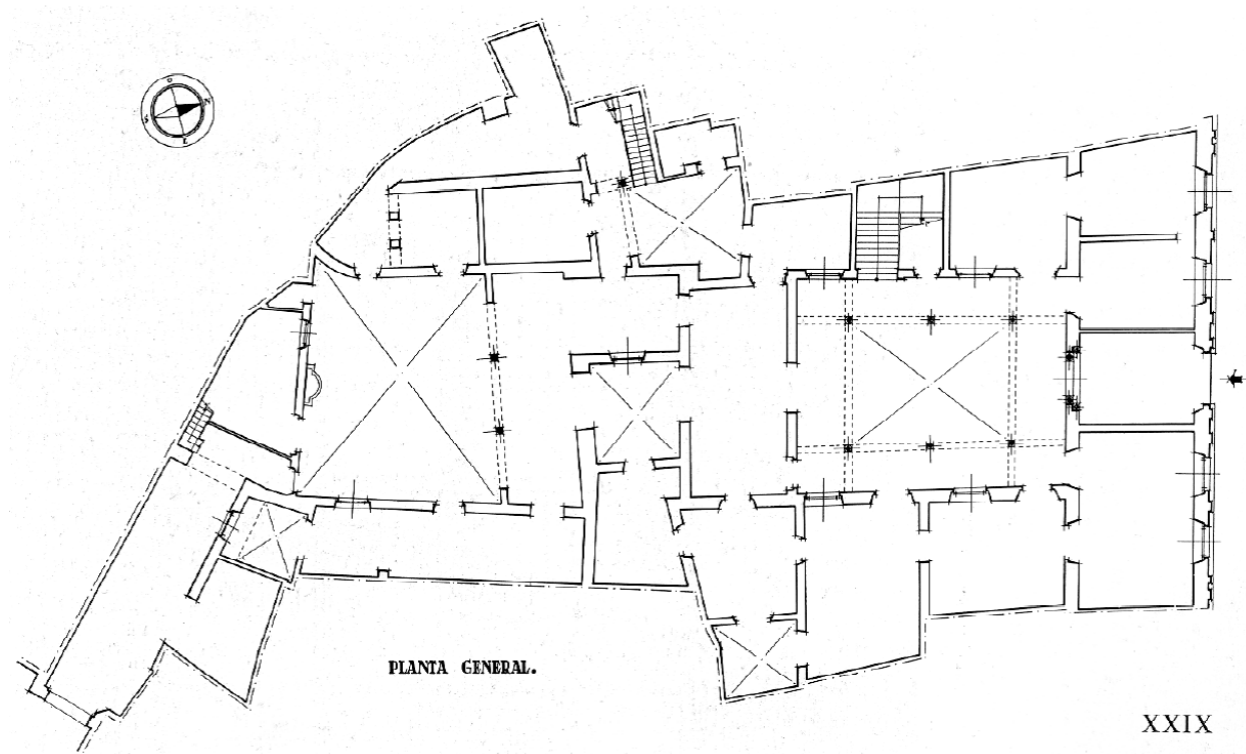


Fig 5-2: Planta de edificio en C/ Conde de Ibarra 18

Tomada de: Ollero Lobato, F. (2005). *Arquitectura doméstica en Sevilla durante la segunda mitad del siglo XVIII*. Atrio, 10/11(113), 113–124, pag. 113

La casa sevillana suele tener dos plantas y alguna construcción accesoria en el tercer nivel. Se organiza a partir de un patio central, de forma cuadrada o rectangular. El resto de la vivienda se distribuye alrededor del patio, colmatando la manzana, cuyos linderos suelen ser bastante irregulares, a imitación de la tradición en las grandes casas y palacios sevillanos. Ejemplo de ello son el edificio de la calle Conde de Ibarra 18 (ver Fig 3-2) o de la calle Castelar 14 y 16¹¹.

Merece la pena recordar la célebre cita atribuida a Fernán Caballero:

Se cuenta que cuando un sevillano mandaba labrar su casa, decía a su arquitecto. Hagame V. en este solar un gran patio y buenos corredores; si terreno queda hagame V. habitaciones.

En la Fig 3-3 se presentan algunos ejemplos de casa patio sevillana, diferenciándolas según la disposición del patio y las galerías:

- De patio central con cuatro galerías
- De patio central con dos galerías
- De patio adosado a la medianera

11 Ollero Lobato, F. (2005). *Arquitectura doméstica en Sevilla durante la segunda mitad del siglo XVIII*. Atrio, 10/11(113), 113–124

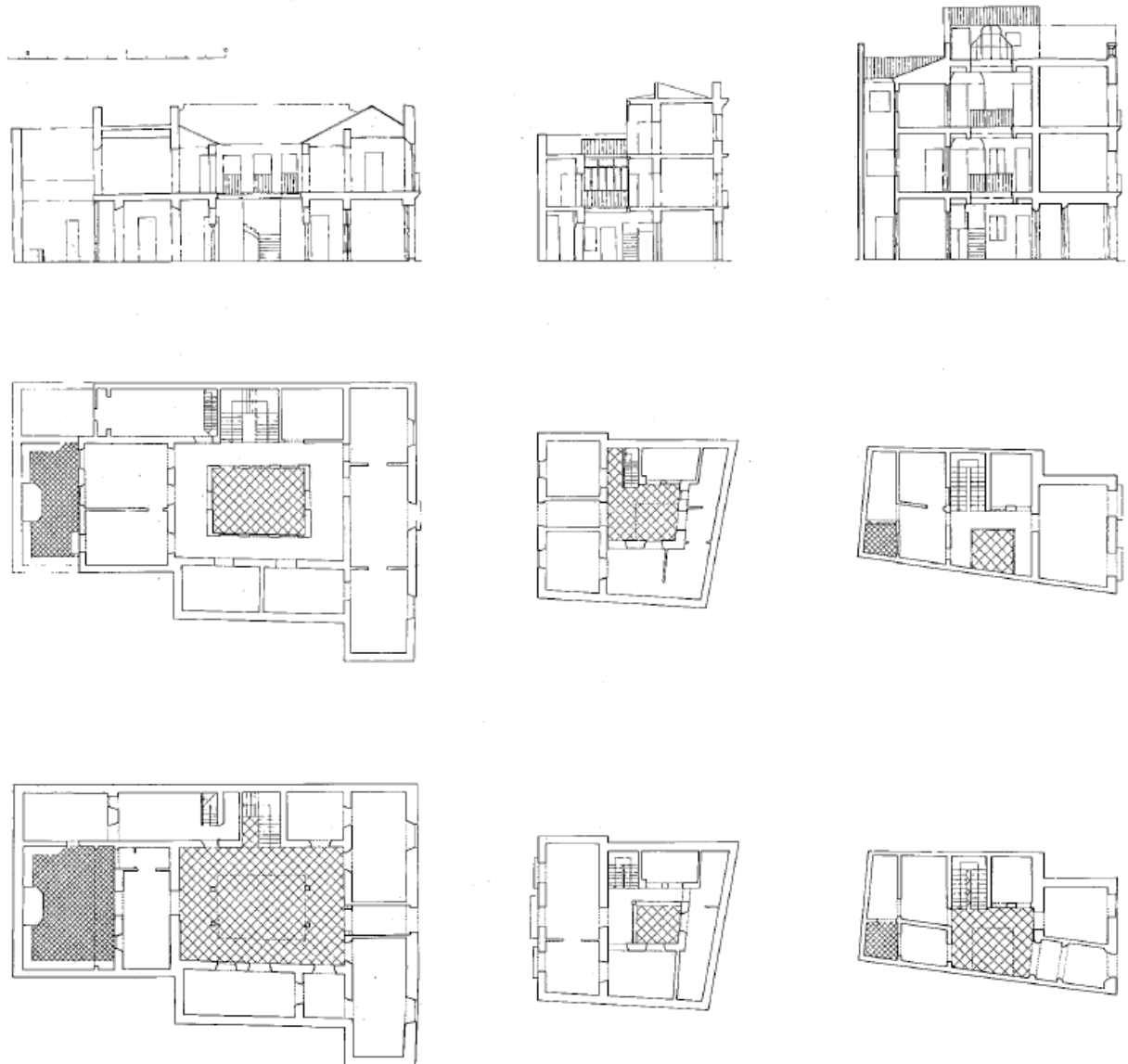


Fig 5-3: Tres ejemplos de casa patio: de cuatro galerías, de patio central con dos galerías y de patio adosado a la medianera.

J. A. Fernández Naranjo and F. Vázquez Teja, "El tipo de casa patio," *2C construcción la Ciudad*, no. 11, pp. 12-13, Jun. 1978

Pero las principales fuentes de información acerca de la configuración arquitectónica de este tipo edificatorio han sido los dos trabajos de José Ramón Sierra: la tesis doctoral “Introducción al análisis formal de la arquitectura doméstica popular en Sevilla”¹² y el catálogo de la exposición “La casa en Sevilla: 1976-1996”¹³

En estos trabajos se presentan varias simplificaciones tipológicas muy interesantes, como las de la Fig 3-4 o las de la Fig 3-5.

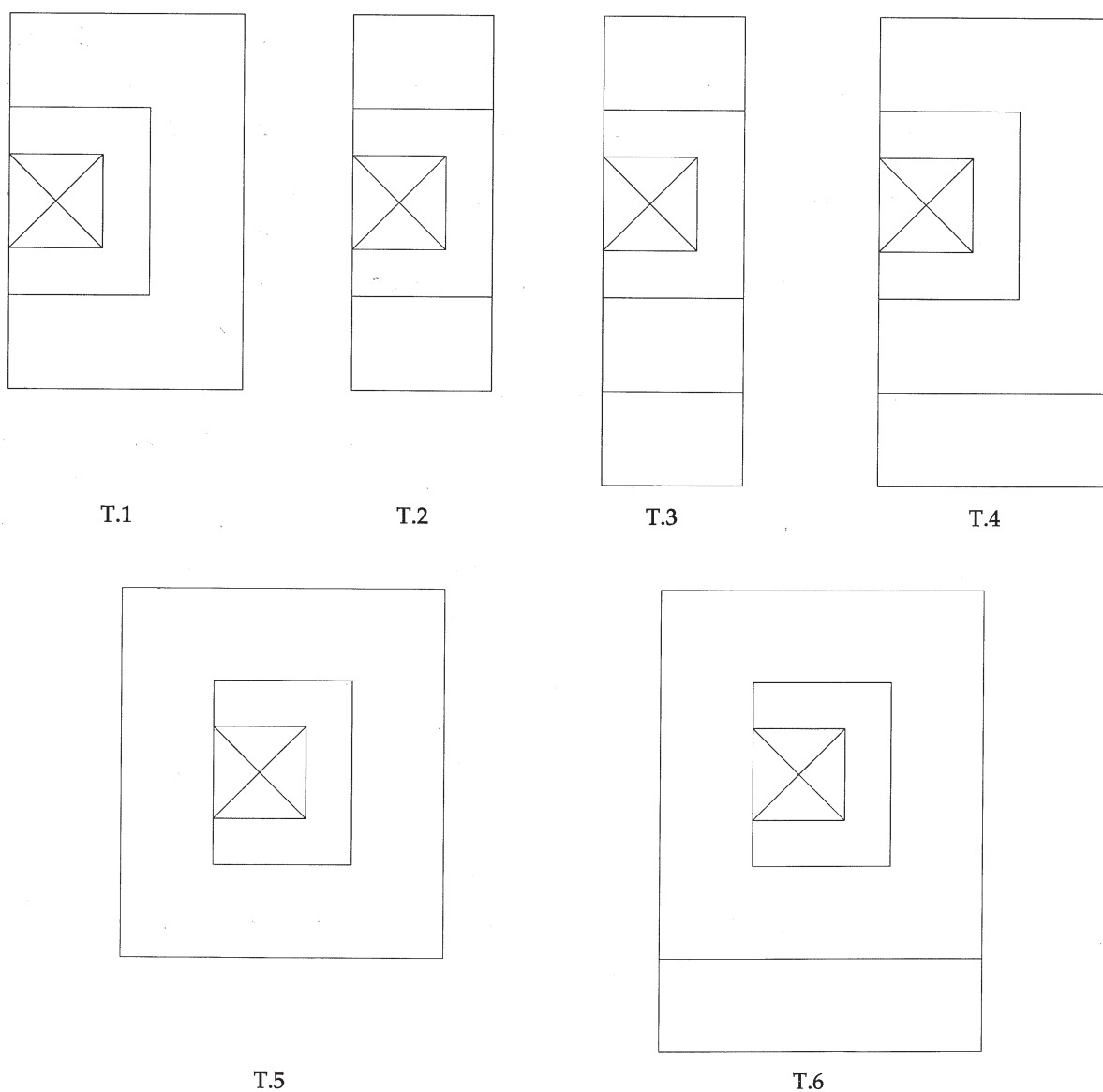


Fig 5-4: Representación gráfica de disposiciones de las crujías alrededor del patio

12 Sierra Delgado, J. R., & Manzano Martos, R. (1980). Introducción al análisis formal de la arquitectura doméstica popular en Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Sevilla

13 Sierra Delgado, J. R. (1996). La casa en Sevilla: 1976-1996 [exposición] : Real Monasterio de San Clemente, Sevilla, febrero 1996. Fundación El Monte

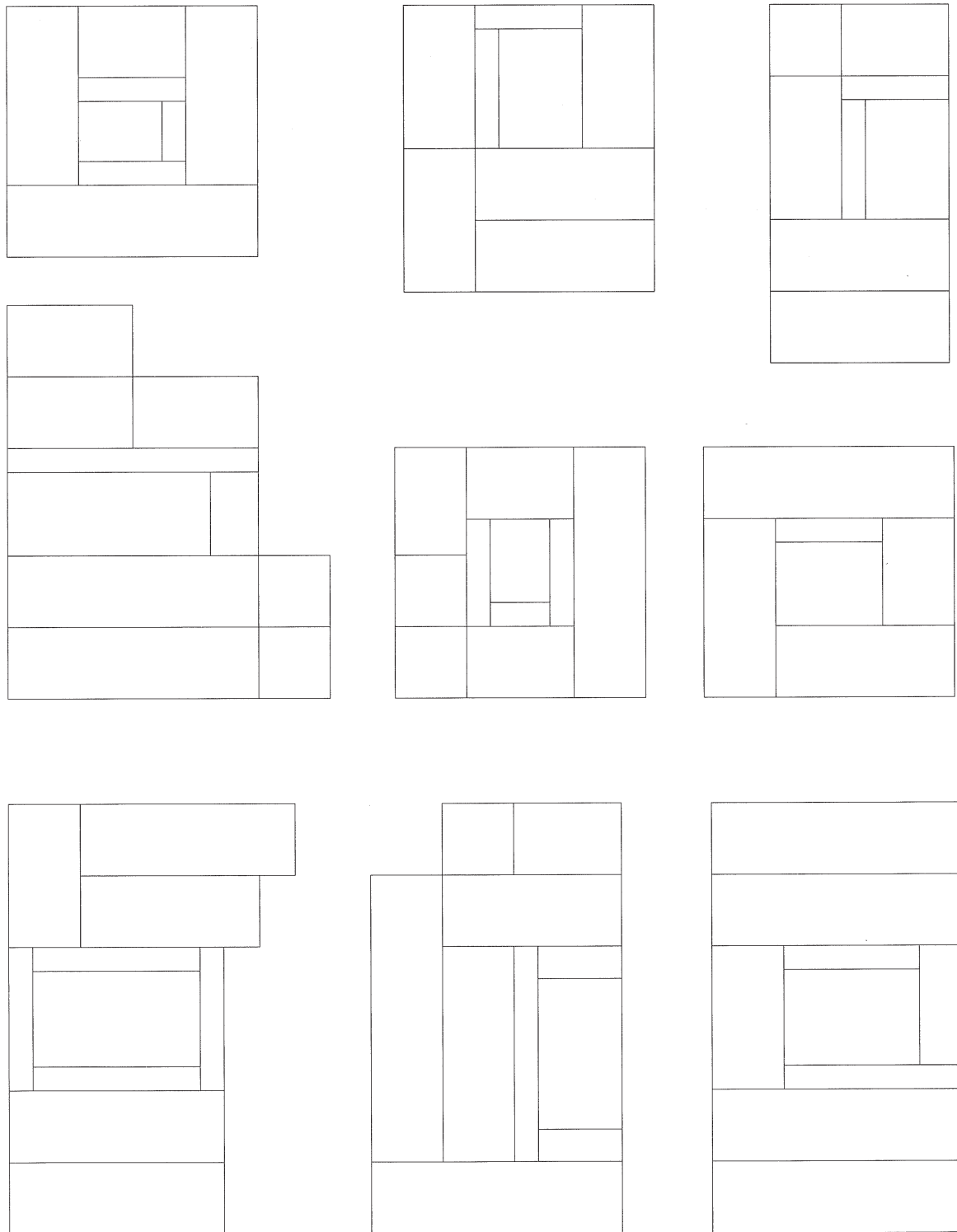


Fig 5-5: Representación gráfica de algunos tipos de retículas resistentes

3.3 Definición constructiva

Como se ha expuesto en la descripción del parcelario, los edificios estudiados han sido construidos en diferentes siglos, muchos de ellos labrados sobre la traza de edificios anteriores.

Por ello, nos encontramos una gran heterogeneidad de soluciones constructivas. No obstante, hay soluciones constructivas comunes a varios periodos y elementos constructivos que han evolucionado poco a lo largo del tiempo.

A continuación se detallan algunas de las soluciones más habituales, descritas en Pérez Galvez¹⁴ y Pérez Galvez *et al.*¹⁵, Huete Fuertes *et al.*¹⁶ y Barrios Padura¹⁷

3.3.1 Cimientos

Por regla general el tipo constructivo habitual es el de zapata corrida bajo los muros de cargas. Pueden encontrarse algunos casos puntuales, donde la potencia del estrato superior blando ha hecho necesaria la disposición de pozos y arcos de descarga.

En el caso general, de zapata corrida, la dimensión del sobreancho suele ser inferior a la mitad del espesor del muro. Es mas, en la mayoría de los casos que he tenido ocasión de estudiar, el sobreancho era inferior a un pie.

El problema habitual con que podemos encontrarnos al estudiar un edificio en Sevilla es que se hayan utilizado anchos de cimiento muy parecidos para muros de carga y de través. Algunas veces incluso arrancan desde el suelo sin ningún sobreancho (ver Fig 3–8). En otras ocasiones, el cimiento puede ser demasiado superficial y estar apoyado sobre un estrato poco resistente (ver Fig 3–6).

En la Fig 3–7 podemos ver un resumen de los tipos habituales de cimientos, tomadas de Huete Fuerte *et al.* (*op.cit.*, 2005).

14 F. Pérez Gálvez, *op.cit.*, 2004

15 F. Pérez-Gálvez, C. Rodríguez-Liñán, and P. Rubio, *op.cit.*, 2009

16 R. Huete Fuertes, A. Jaramillo-Morilla, C. Rodríguez-Liñán, V. Sanz Cuesta, and L. Suárez Samaniego, *Protocolo de inspección técnica de edificaciones ITE*. Sevilla, 2005

17 Barrios Padura, Á. (2001). *Estudio de las Cimentaciones de Edificios Históricos en la Provincia de Sevilla. Siglo XII al XVI*. Universidad de Sevilla



Fig 5-6: Cimiento de edificio en C/ Rodríguez Marín.

En este caso todos los muros, de carga y de atado, presentan cimientos con las mismas características geométricas. Imagen propia.

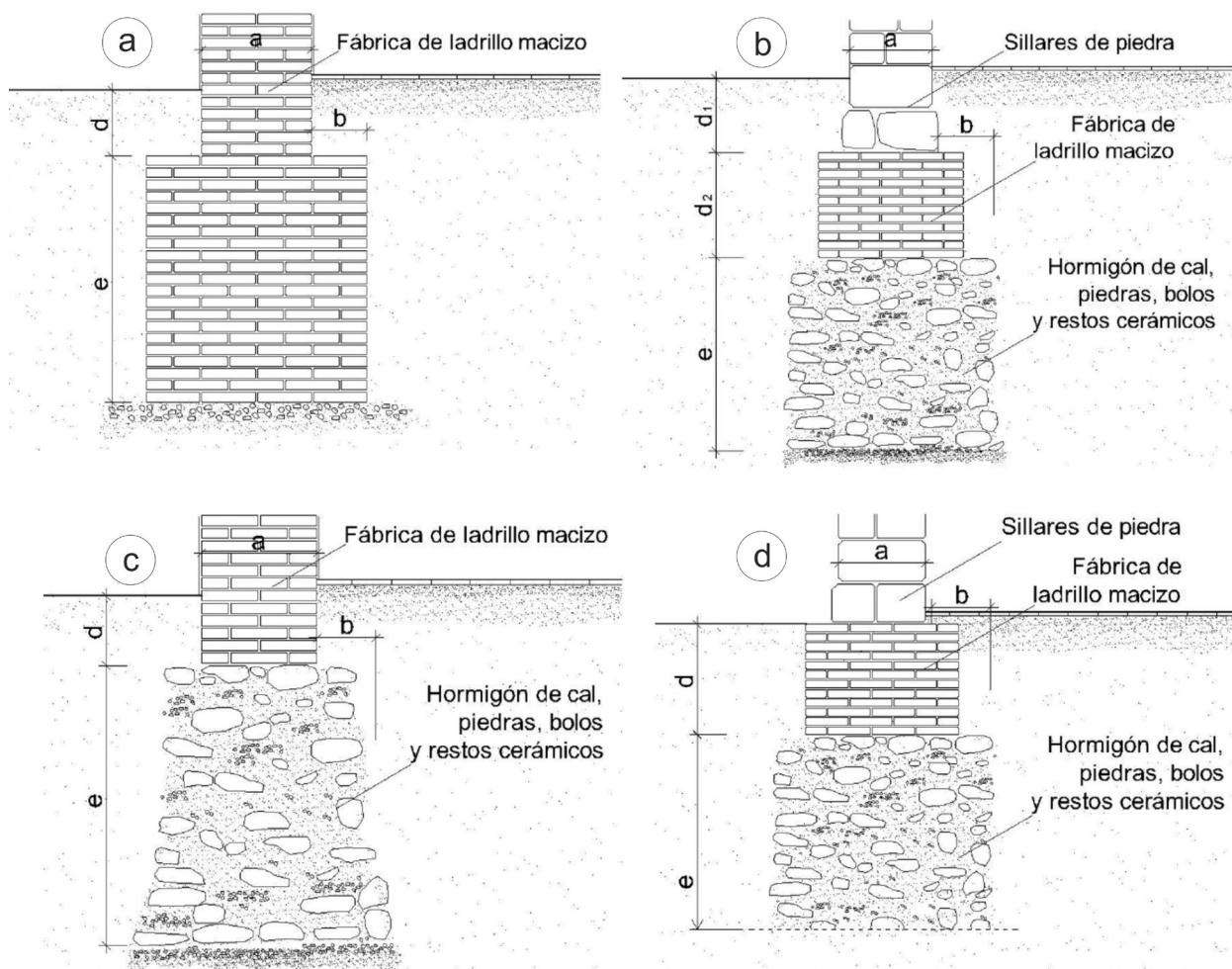


Fig 5-7: Tipos de cimientos

- a: Zapata corrida de fábrica de ladrillo.
- b: Zapata corrida de fábrica de ladrillo y hormigón de cal.
- c: Zapata corrida de hormigón de cal.
- d: Pozo de cimentación de fábrica de ladrillo y hormigón de cal.

Fig 5-8: Cata junto a muro.

En este caso puede observarse como el muro arranca desde el fondo de la cimentación, sin sobreancho. Imagen propia.





Fig 5-9: *Sobrecanchos en la cimentación de un muro en C/ Jesús de Gran Poder, 93. En este caso se aprecian varias escarpas y distinta configuración en los dos muros. Imagen propia.*

Por otra parte, nos encontramos que el suelo presenta tres tipos habituales de problemas¹⁸:

- a) Hay un extrato superior de relleno antrópico muy variable y con baja capacidad de carga.
- b) Existe un extrato arcillosos de potencia variable que en algunas zonas es ligeramente expansivo.
- c) Hay un alto grado de humedad general y un gran número de problemas de filtraciones por roturas en las redes de abastecimiento de agua y de saneamiento.

Todos ellos dan origen a distintos tipos de lesiones en los muros. Como veremos en el punto 3.4.3.

18 Sierra Delgado, J. R, op.cit., 1996, pag. 59

3.3.2 Muros

Según describe Sierra¹⁹:

De entre las características geométricas de los muros, pueden señalarse como fundamentales las siguientes: un ancho variable, que puede alcanzar los 60 y 70 cms; un trazado rectilíneo, pero de quiebros frecuentes; y la disposición sobre una retícula irregular de una ortogonalidad aproximada.

El ladrillo más común es el tipo macizo “de tejar”. Nos podemos encontrar dos formatos, 29(±2) x14(±1)x5(±1) y 24(±1)x12(±1)x5(±1), siendo el primero el habitual en los edificios hasta el siglo XX.

El mortero es de cal, con diferentes dosificaciones. En algunos casos puntuales se han encontrado dosificaciones muy ricas en cal, mientras que en otros han sido muy bajas e incluso mezclada con barro.

Las sucesivas intervenciones sobre una misma parcela: reformas, agregaciones y segregaciones,



Fig 5–10: Muro con relleno interior de tapial

Imagen tomada de:

Jaramillo-Morilla, A., Rodríguez-Liñán, C., de Justo Alpañés, J. L., Romero-Hernández, R., & Pérez-Gálvez, F. (2000). *Características de los muros antiguos de Sevilla*. In A. Graciani García, S. Huerta, E. Rabasa, & M. A. Tabales Rodríguez (Eds.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Sevilla 26-28 Octubre 2000 (pp. 26–28). Madrid, Spain: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla.

19 Sierra Delgado, J. R, op.cit., 1996, pag. 61

remontes y colmataciones hacen que en un mismo edificio nos encontremos distintos espesores de muro y distintos tipos de aparejos (ver Fig 3–11).

En muros de más de dos pies es habitual encontrar el muro doblado con relleno de mortero de cal con inclusión de cascotes (ver Fig 3–10).

El perímetro de los edificios podemos encontrarlo en ocasiones resuelto mediante muros conti-

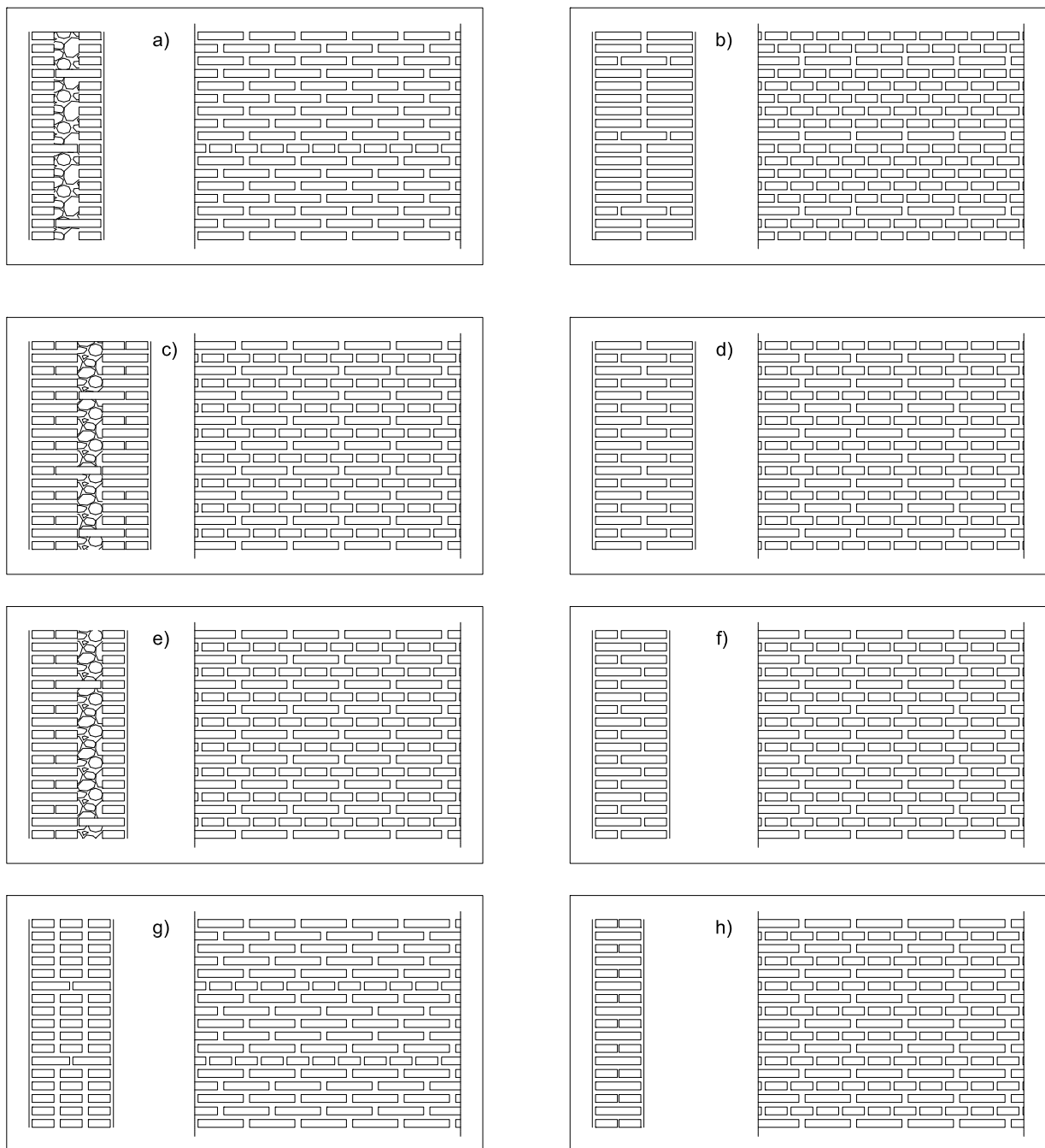


Fig 5–11: Tipos de aparejos

guos, pero en la mayoría de los casos se tratará de simples medianeras.

3.3.3 Forjados

Podemos encontrar varios tipos de forjados, que resumimos en la Fig 3–12:

- Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de ladrillo, rasilla o azulejo (a). Con viguetas de 13 a 14 cm de ancho, 17 a 19 cm de canto e intereje de 30 a 45 cm.
- Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de madera simple (b), con tapajuntas, con casetonado (c) o incluso con viguetillas de formación del casetonado . Con viguetas de 10 a 15 cm de ancho, 14 a 20 cm de canto e intereje de 40 a 50 cm.
- Forjado de viguetas de madera aserrada y revoltón de rasillas (d).
- Forjado de rollizos de 10 cm de diámetro y cañizo, tablero de madera (e) o de ladrillo (f), intereje de 30 a 40 cm.

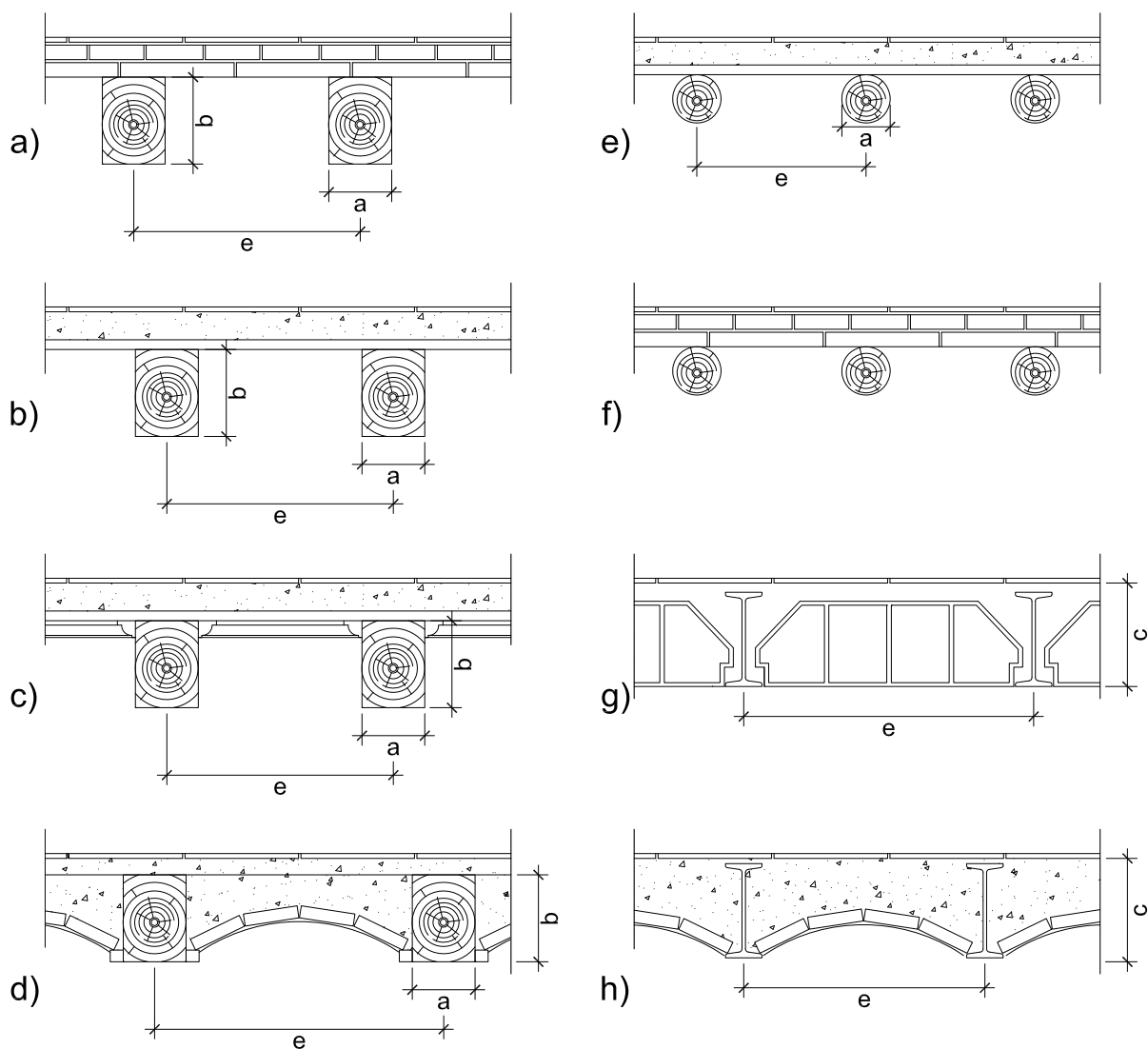


Fig 5–12: Tipos de forjados tradicionales en Sevilla

Fig 5-13: Forjado de rollizos
Imagen propia.



Fig 5-14: Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de madera simple.
Puede apreciarse la luz que entra junto a la pared lateral, que evidencia la falta de conexión con dicho muro.
Imagen propia.



Fig 5-15: Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de madera simple.
En C/ Rodríguez Marín. Se aprecia como se han introducido algunos cargaderos.
Imagen propia.

Fig 5-16: Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de madera simple.
Puede comprobarse que en este caso no existe ningún relleno superior ni solería.
Imagen propia.



Fig 5-17: Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de madera simple.
Imagen propia.



- Forjado de viguetas metálicas, con bovedilla cerámica (g) o revoltón de rasillas (h). Cantos de entre 10 y 24 cm e interejo entre 60 y 80 cm.

La organización espacial de los muros da lugar invariablemente a dos tipos de crujías²⁰:

- Crujías enteras, definidas por dos muros de carga
- Medias crujías, dispuestas entre un muro de carga y una viga o arco y que habitualmente se destinan a galerías de distribución (ver Fig 3–18).

Según la misma referencia, las crujías enteras suelen tener un ancho de 2,5 a 4,5 ms, mientras que las medias crujías tienen entre 1 y 2 ms.

En el caso particular de forjados con viguetas metálicas pueden llegar a los 7 m.



Fig 5–18: Forjado de viguetas de madera en galería de distribución de patio en edificio C/ Parras. Imagen propia.

20 Sierra Delgado, J. R, op.cit., 1996, pag. 61



Fig 5-19: Forjado de viguetas de madera aserrada, con viguetillas de formación del casetonado y tablero de rasilla.
Imagen propia.



Fig 5-20: Forjado de viguetas de madera aserrada, con viguetillas de formación del casetonado y tablero de rasilla en C/ Teodosio.
Imagen propia.

Fig 5-21: Forjado de viguetas de madera aserrada, con revoltón. En C/ Teodosio. Se aprecia la disposición de una zona reforzada mediante doble vigueta. Imagen propia.



Fig 5-22: Forjado de viguetas de madera aserrada, con revoltón. En C/Dos de Mayo . Comparar el interese de este forjado con el de la figura anterior. Imagen propia.



Suelen estar recubiertos inferiormente mediante alfarjías y cañizos o mediante tablas recubiertas de yeso²¹

La entrega de las viguetas en el muro se realiza siempre mediante apoyo directo. Algunas veces dejando el apoyo al aire para evitar la pudrición de la madera y en la mayoría de los casos con retacado total del hueco (ver Fig 3–24 y Fig 3–25).

Una característica fundamental es que no suele existir una autentica conexión entre el forjado y los muros de atado. En algunos casos la tablazón penetra ligeramente en el muro, en otros casos hay una vigueta paralela al muro pero en la mayoría de los casos la junta está simplemente disimulada mediante un rodapie. En ninguno de los casos que he



Fig 5–23: Encuentro del forjado con el muro de través. Edificio en C/ Almirante Hoyos nº8. Puede apreciarse la ausencia de elementos de conexión. Imagen propia.



Fig 5–24: Encuentro del forjado con el muro de carga. Edificio en C/ Rodríguez Marín. Se aprecia el apoyo directo de los rollizos de madera en el muro, llegando a sobresalir por la cara contraria. Imagen propia.



Fig 5–25: Encuentro del forjado con el muro de carga. Edificio en C/ José María Izquierdo nº 32. Se aprecia el apoyo directo de los rollizos de madera en el muro, llegando a sobresalir por la cara contraria. Imagen propia.

tenido ocasión de estudiar se han encontrado elementos de conexión como los que describen las modernas normas internacionales que afectan a los forjados de madera.

A partir de mediados del siglo XX, en edificios de nueva planta o en edificios en los que se han ejecutado refuerzos y reformas, podemos encontrar forjados de hormigón armado o pretensado,

Fig 5-26: Forjado cerámico

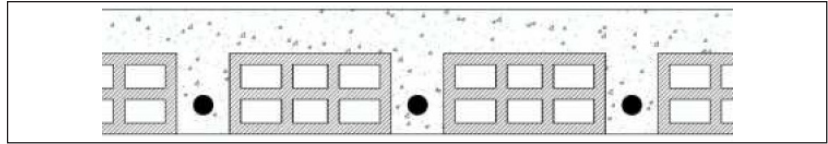


Fig 5-27: Forjado cerámico.
Edificio del Mercado de la Puerta de la Carne.

En este caso está ejecutado con ladrillo y armadura dispuesta en la llaga, en las dos direcciones.
En el mismo edificio podemos encontrar una solución similar pero unidireccional.
Imagen propia.



Fig 5-28: Forjado ejecutado mediante losa de hormigón armado.
Edificio en C/ José María Izquierdo nº 32.

Se trata de una losa unidireccional de 14 cm de espesor.
Imagen propia.



Fig 5-29: Forjado ejecutado mediante losa de hormigón armado.
Edificio en C/ Sol.
En este caso, la losa está ejecutada sobre un encofrado inferior de rasilla.
Imagen propia.





Fig 5–30: Formación de dintel plano de ladrillo
Imagen propia.

ejecutados con viguetas, cerámica armada e incluso algunas losas.

3.3.4 Huecos

Los huecos suelen tener escasa anchura, al menos inicialmente, con una proporción hueco/macizo pequeña. En general suelen ser verticales. Se resuelven con dintel de ladrillo plano o curvo (ver Fig 3–30) o mediante cargadero de madera.

Los huecos de fachada suelen ser abocinados, tanto en las jambas como en el dintel (ver Fig 3–16).

Con el paso del tiempo, en planta baja han ido ampliándose los huecos, tanto en los muros de fachada como en los muros interiores, con el objeto de permitir el uso como local comercial.

3.4 Lesiones habituales

3.4.1 Estado de conservación

Pérez Gálvez²² expone un resumen del estado de la edificación basada en los catálogos del Plan

22 Pérez Gálvez, F. (2004). Las obras de fábrica en la arquitectura doméstica sevillana de los siglos XVIII y XIX: características constructivas y parámetros resistentes. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Sevilla. Pag 72

General de Ordenación Urbana de Sevilla de 1987, en el que se concluye:

Según estos porcentajes un 47,81% de los edificios están o estarán a corto o medio plazo en proceso de rehabilitación, debiéndose aplicar en todos ellos la Normativa en vigor en cuanto a la conservación de los muros portantes de fachada, que en prácticamente todos los casos están formados por fábrica de ladrillo.

El trabajo en cuestión es del año 2004 y el catálogo es del año 1987, por lo que los porcentajes habrán cambiado a día de hoy, pero nos puede dar una idea de la magnitud del objeto de estudio.

A fin de simplificar el problema, y reducir el número de variables hemos reducido el ámbito de estudio. Nos hemos centrado en edificios tradicionales de uso residencial, con estructura de obra de fábrica, localizados en el casco histórico de Sevilla. Con ello hemos disminuido bastante el

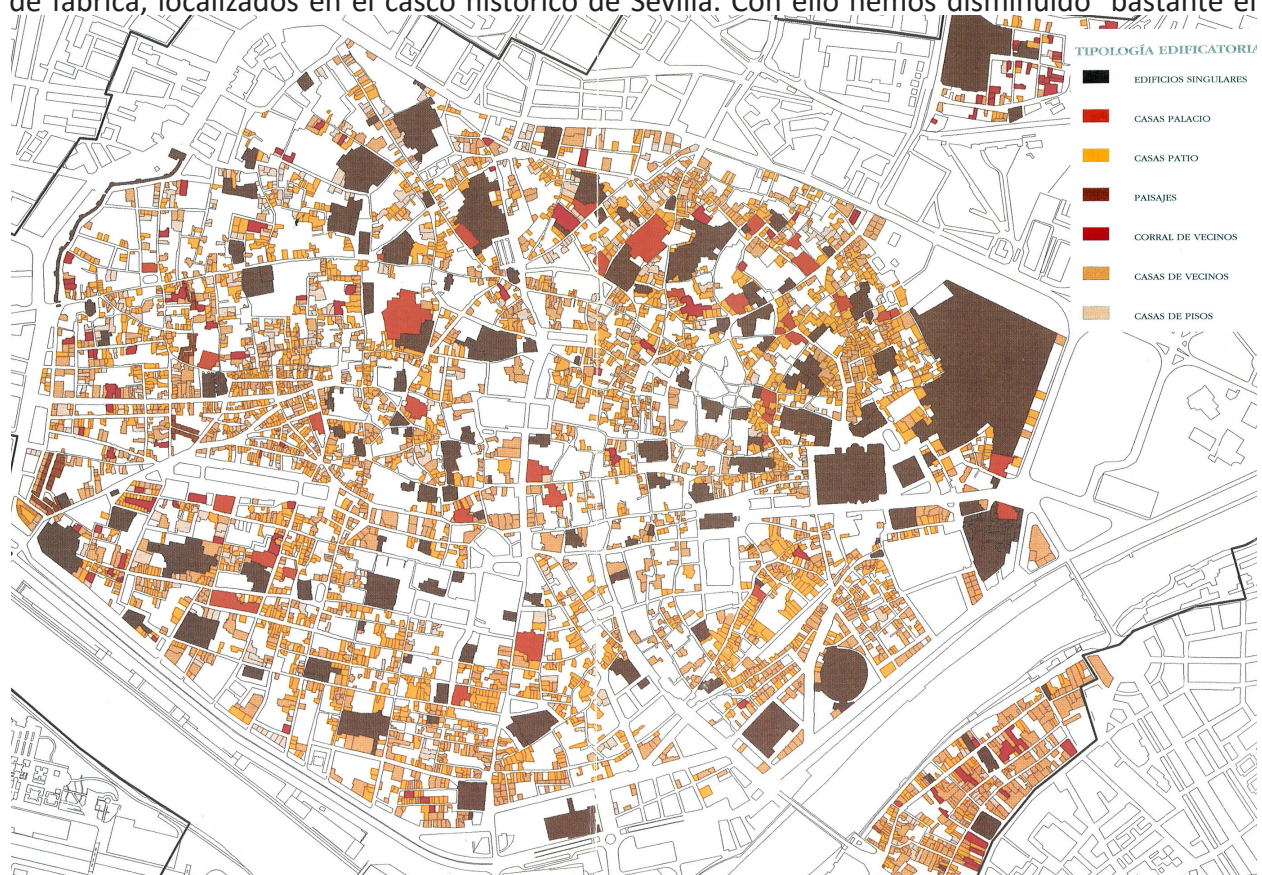


Fig 5-31: Tipología edificatoria

Imagen tomada de Sevilla. Gerencia Municipal de Urbanismo, J. García Tapial y León, and M. J. García Jaén, *El conjunto histórico de Sevilla : avance del Plan Especial de Protección*. Sevilla: Ayuntamiento de Sevilla, Gerencia Municipal de Urbanismo, 1995

número de variables: el tipo constructivo, las dimensiones, el catálogo de lesiones habituales... Estas variables han sido sintetizadas a partir de los trabajos de Pérez Galvez²³ y Pérez Galvez et

23 F. Pérez Gálvez, op.cit., 2004.

*al.*²⁴ y Huete Fuertes *et al.*²⁵

3.4.2 Cimientos

Como se ha expuesto anteriormente, la lesión más habitual en el cimiento de los edificios de obra de fábrica es el asiento diferencial del mismo. Suele deberse a una o varias causas simultaneas:

- El terreno de baja capacidad portante.
- El inadecuado dimensionamiento de la base del cimiento.
- La humedad elevada.
- Las roturas puntuales de las canalizaciones de saneamiento, privadas y públicas.
- Las excavaciones vecinas

3.4.3 Muros

Aparecen habitualmente varios tipos de lesiones:

- a) Grietas inclinadas, normalmente con forma de parábola invertida, que son debidas a un asiento puntual localizado bajo el muro. Suele tener su origen en roturas de alcantarillado o a excavaciones en las parcelas colindantes.
- b) Grietas verticales en la unión entre muros de carga y de través, debida a un asiento mayor bajo el muro de carga. Suelen ser lesiones antiguas, provocadas por un diseño inadecuado del cimiento. Es un tipo de lesión muy común y que por su antigüedad puede estar oculta tras papel pintado, armarios.
- c) Grietas inclinadas formando cruces. Son menos habituales en Sevilla. Tienen su origen en movimientos de tipo sísmico.

Mostramos a continuación algunas fotografías en las que se aprecian claramente unas y otras.



Fig 5-32: Grietas inclinadas en edificio en C/ Relator cuya causa probable es la excavación de un sótano en el edificio colindante. Imagen propia.

características mecánicas de los muros XVIII Y XIX," *Inf. la Construcción*, vol. 61,

Cuesta, and L. Suárez Samaniego, [1]

Fig 5-33: Desplome de muro medianero en C/ Lumbreras. Causado por la excavación de un sótano en el edificio colindante. Imagen propia.



Fig 5-34: Grieta en unión entre muro de carga y muro de atado en edificio en C/ Almirante Hoyos. Imagen propia.





Fig 5-35: Habitación de edificio en C/ Dos de Mayo.

En este caso no se aprecian lesiones,. ¿Podríamos afirmar que no existen?

Imagen propia.

Fig 5-36: Habitación de edificio en C/ Dos de Mayo. Los muros han sido revestidos con papel pintado, pero la lesión ha llegado a hacerse visible incluso despues del empapelado. Imagen propia.



Fig 5-37: Habitación de edificio en C/ Dos de Mayo. En este caso, la lesión se evidencia tras arrancar el papel pintado. Imagen propia.



3.4.4 Forjados

Los forjados tradicionales, de viguetas de madera, presentan problemas de deformación excesiva, ataque de insectos xilófagos y pudrición de las cabezas de las vigas. Los problemas en las cabezas de vigas suelen concentrarse en las zonas más húmedas, como fachadas, patios y cubiertas.

En forjados de viguetas metálicas puede existir problemas de corrosión del ala superior y del alma. Estos problemas se acentúan si el forjado es de cubiertas.

La pudrición de las cabezas puede dar lugar a empujes en los muros (ver Fig 3–38)



Fig 5–38: Lesión en forjado.
Las cabezas de algunas viguetas
están podridas y están empujando
al muro.
Imagen propia.



Fig 5–39: Lesión en forjado.
Las cabezas de las viguetas están
podridas. Algunas se han despre-
nido y el resto tienen deformación
excesiva.
Imagen propia.

Fig 5-40: Viguetas reparadas mediante prótesis metálicas. Imagen propia.



Fig 5-41: Corrosión de vigueta metálica. Puede observarse como la corrosión afecta a la totalidad de la sección del perfil, siendo el ala superior y el alma, los elementos mas dañados. Habitualmente esta lesión se debe al uso de yeso en la formación del revoltón, en combinación con una humedad excesiva. Imagen tomada de <http://www.intemac.es/>



3.4.5 Huecos

En dinteles planos, de ladrillo o con cargadero de madera, podemos encontrar grietas y formación de arco de descarga debido a la deformación excesiva del dintel.



Fig 5-42: Lesión en muro sobre dintel de hueco de paso. Se aprecia la típica fisura inclinada intentando formar un arco de descarga. Imagen propia.

4. Marco teórico y parámetros estudiados

4.1 Parámetros que influyen en las características vibratorias.

4.1.1 Tipo geométrico

Del extenso catálogo de Sierra¹ y con la ayuda de las descripciones de Hazañas y la Rúa² se ha seleccionado un conjunto de edificios que posteriormente se han simplificado para extraer seis arquetipos edificatorios de casa-patio.

Los edificios seleccionados son:

- Abades 30
- Alfarería 15
- Alameda de Hércules 93
- Alameda de Hércules 97
- Archeros 1
- Bustos Tavera 41
- Calatrava 30
- Cenicero 2
- Churruca 1
- Corral del Rey 4
- Cristo del Buen Viaje 16
- Doña María Coronel 15
- Doncellas 8
- Doncellas 23
- Enladrillada 42
- Gano 2
- Gano 4
- General Castaño
- Matahacas 14
- Plaza de San Marcos 13
- Sagasta 1
- San Roque

1 Sierra Delgado, J. R. (1996). La casa en Sevilla: 1976-1996 [exposición] : Real Monasterio de San Clemente, Sevilla, febrero 1996. Fundación El Monte.

2 J. Hazañas y la Rúa and F. Hohenleiter, La casa sevillana. Sevilla : Padilla Libros, 1989.

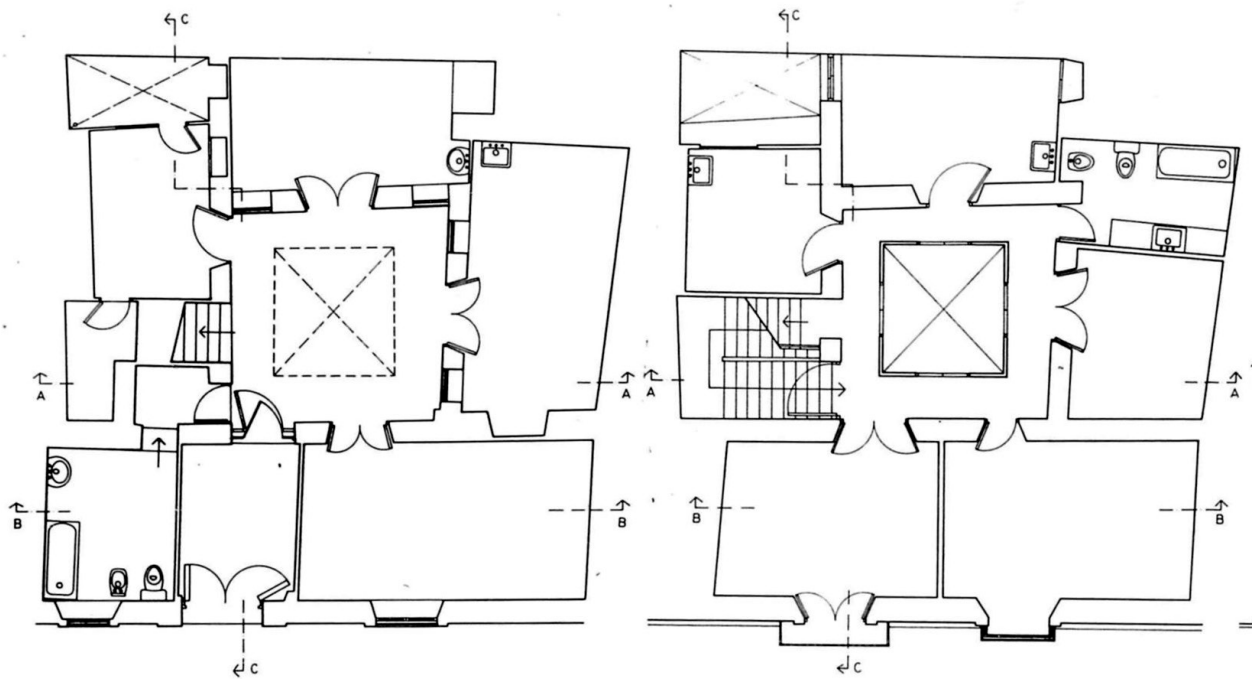


Fig 7-1: Abades 30

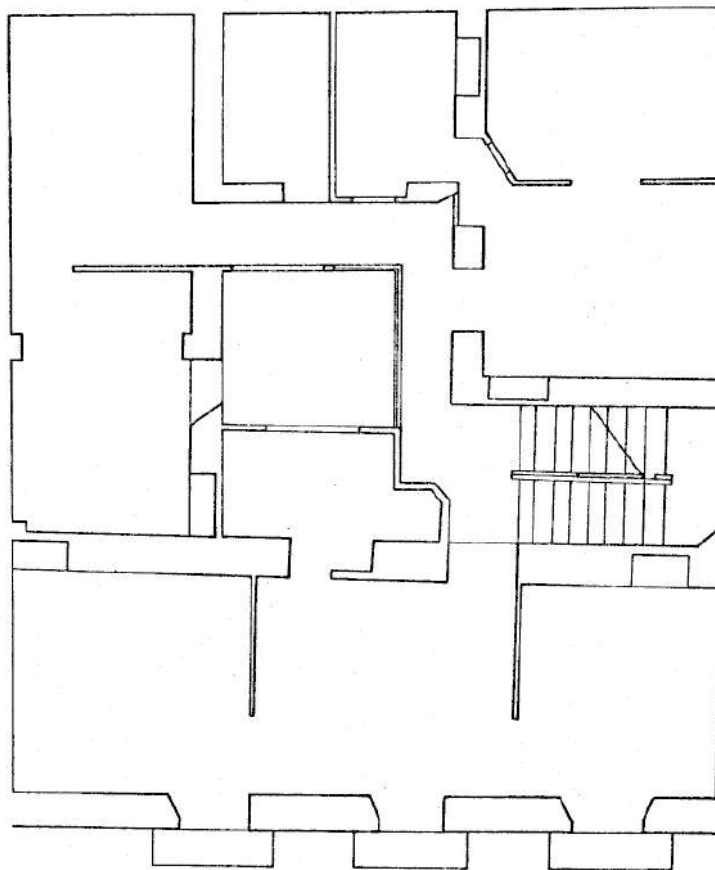


Fig 7-2: Alfarería 15

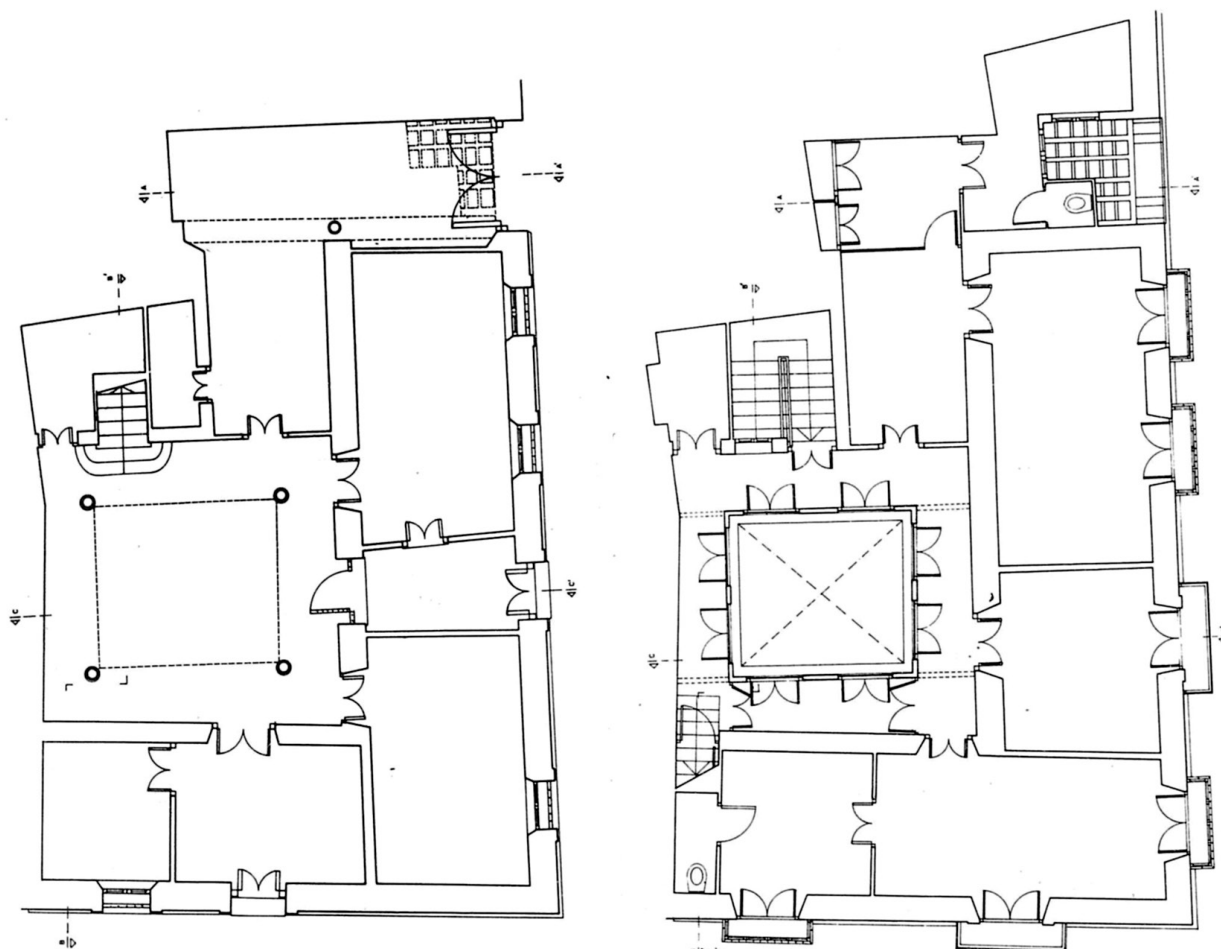


Fig 7-3: Alameda de Hércules 93

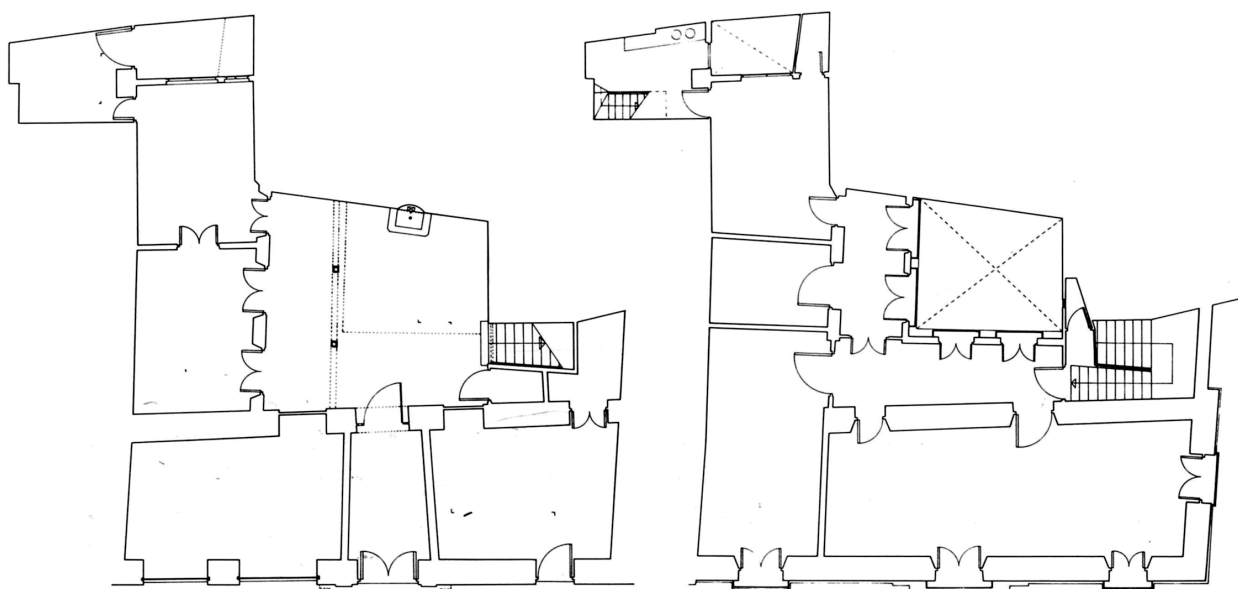


Fig 7-4: Alameda de Hércules 97

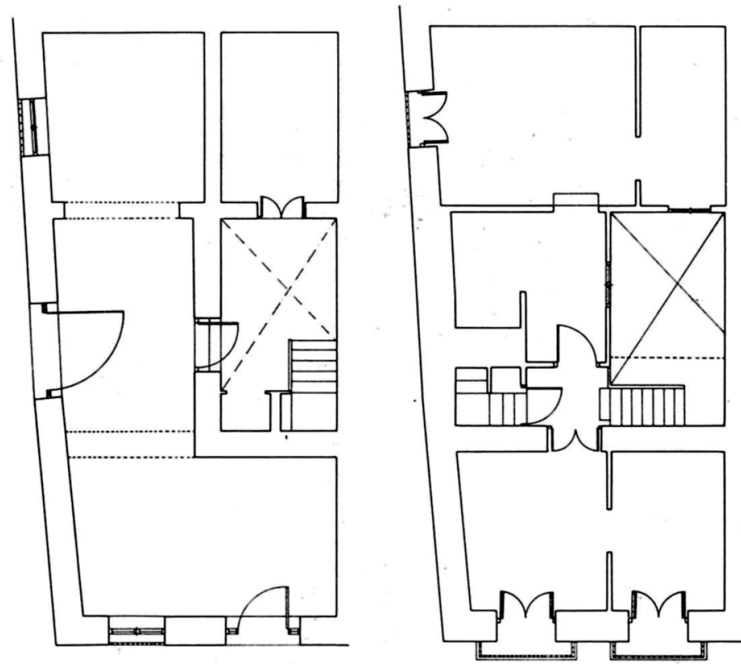


Fig 7-5: Archeros 1

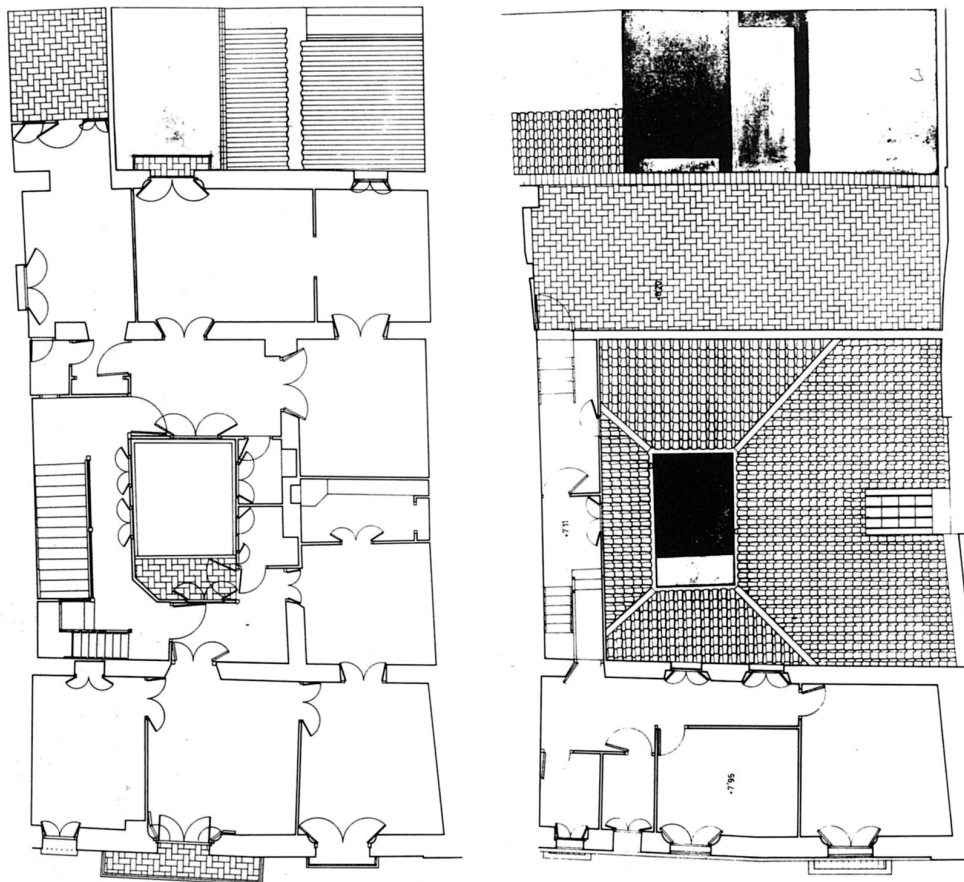


Fig 7-6: Bustos Tavera 41



Fig 7-7: Calatrava 30

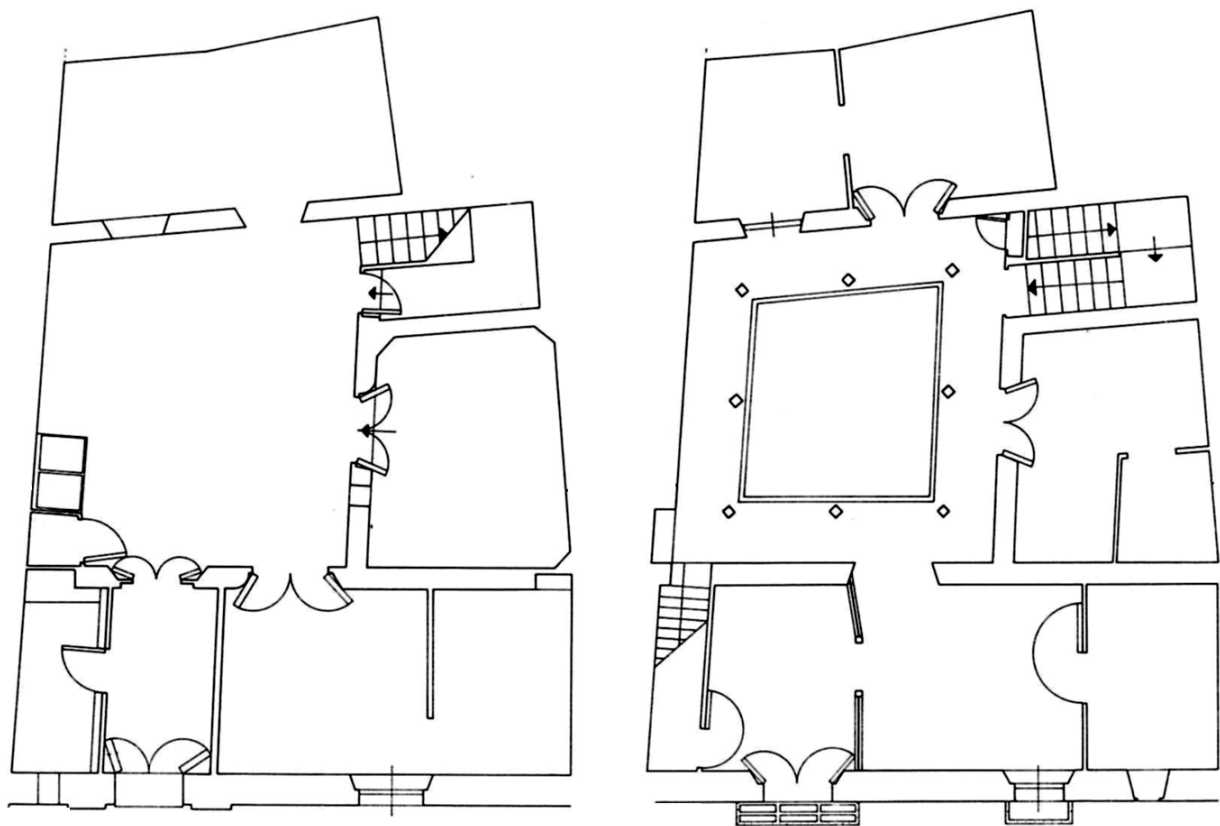


Fig 7-8: Cenicero 2

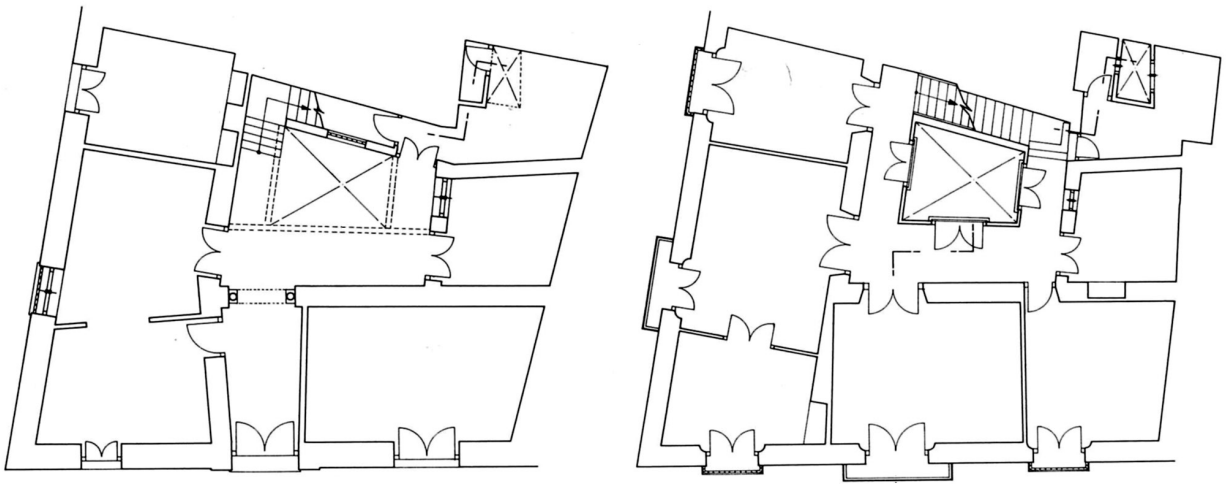


Fig 7-9: Churruca 1

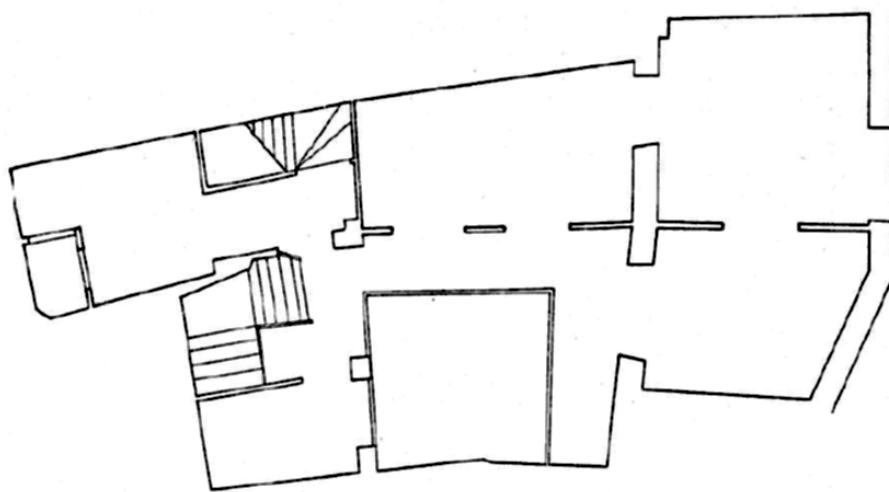


Fig 7-10: Corral del Rey 4

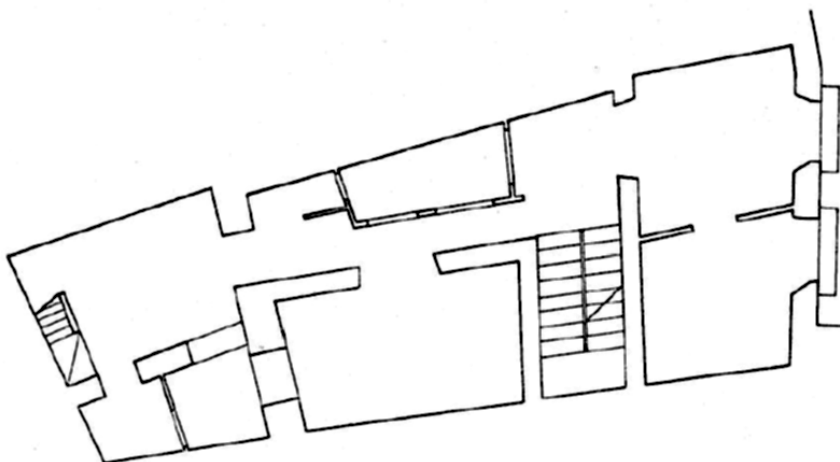


Fig 7-11: Cristo del Buen Viaje 16

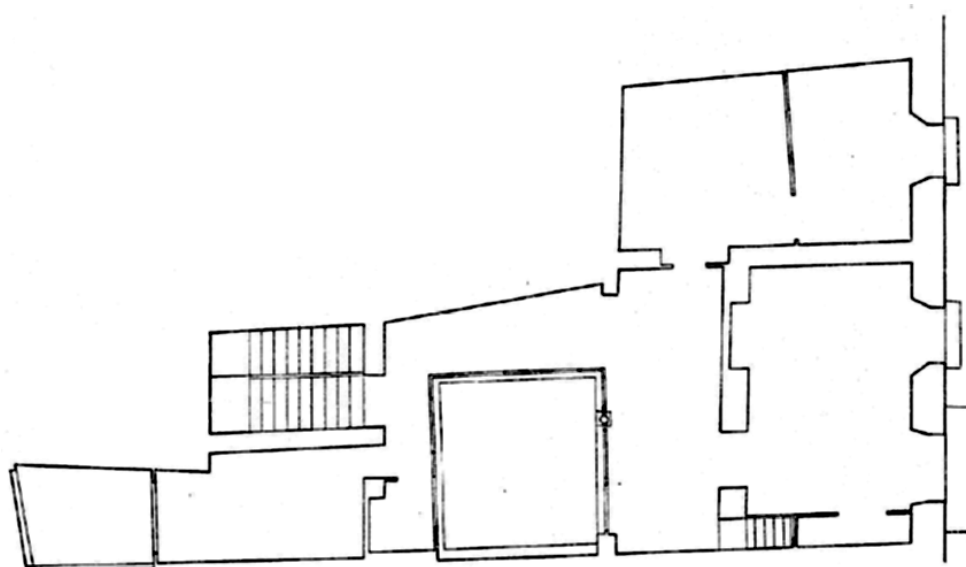


Fig 7-12: Doña María Coronel 15

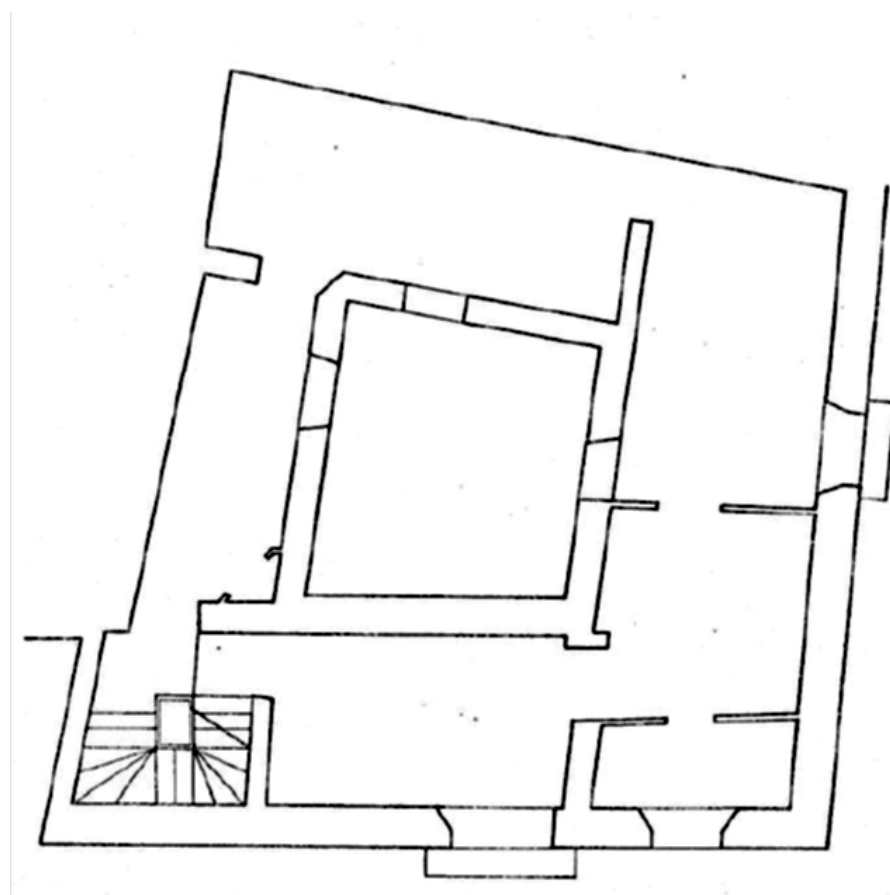


Fig 7-13: Doncellas 8

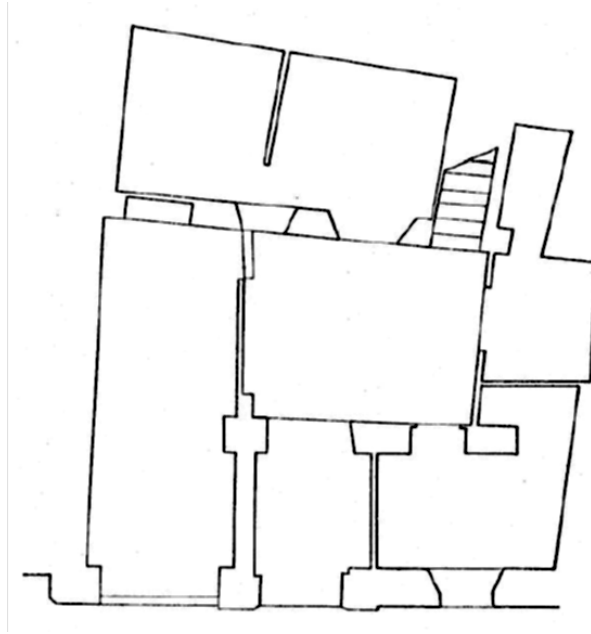


Fig 7-14: Doncellas 23

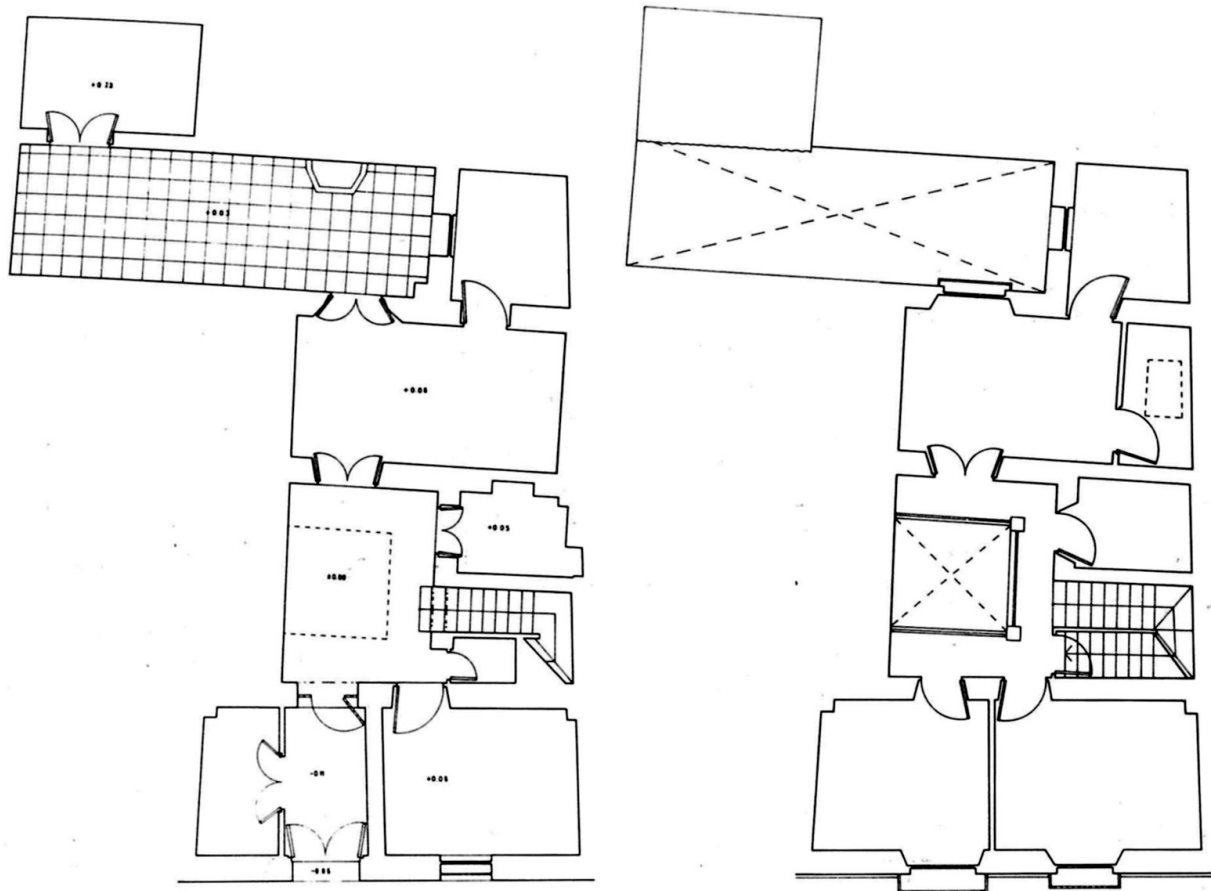


Fig 7-15: Enladrillada 42

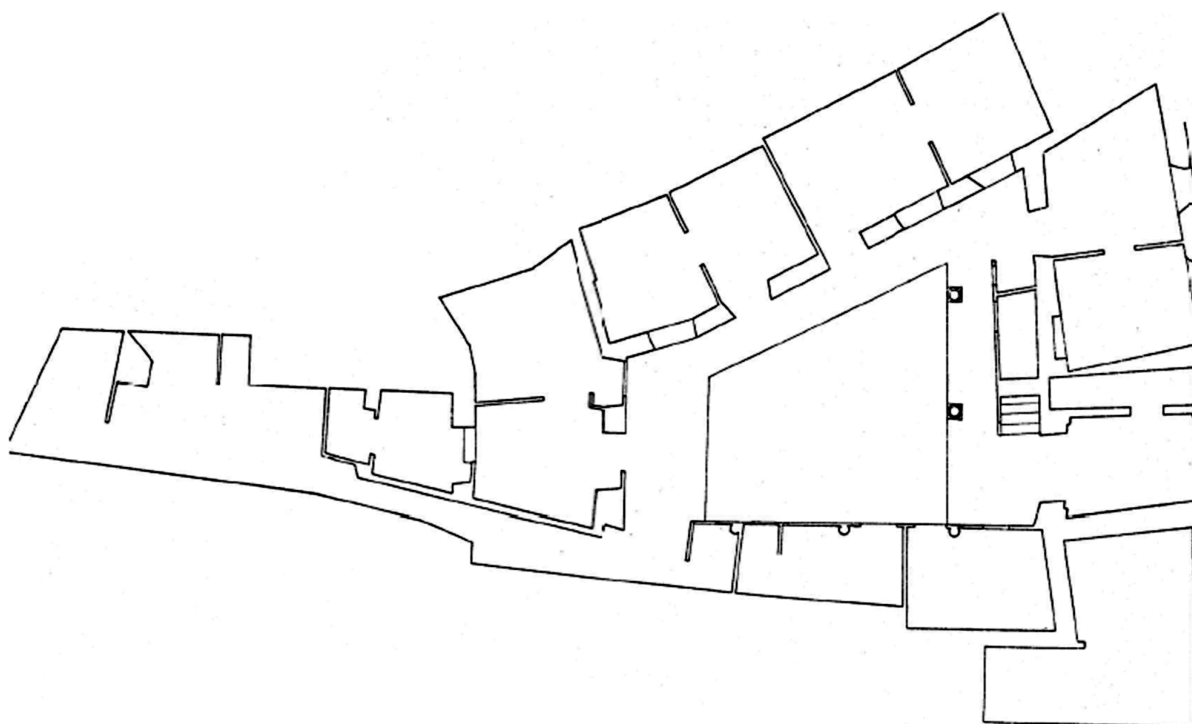


Fig 7-16: Gano 2

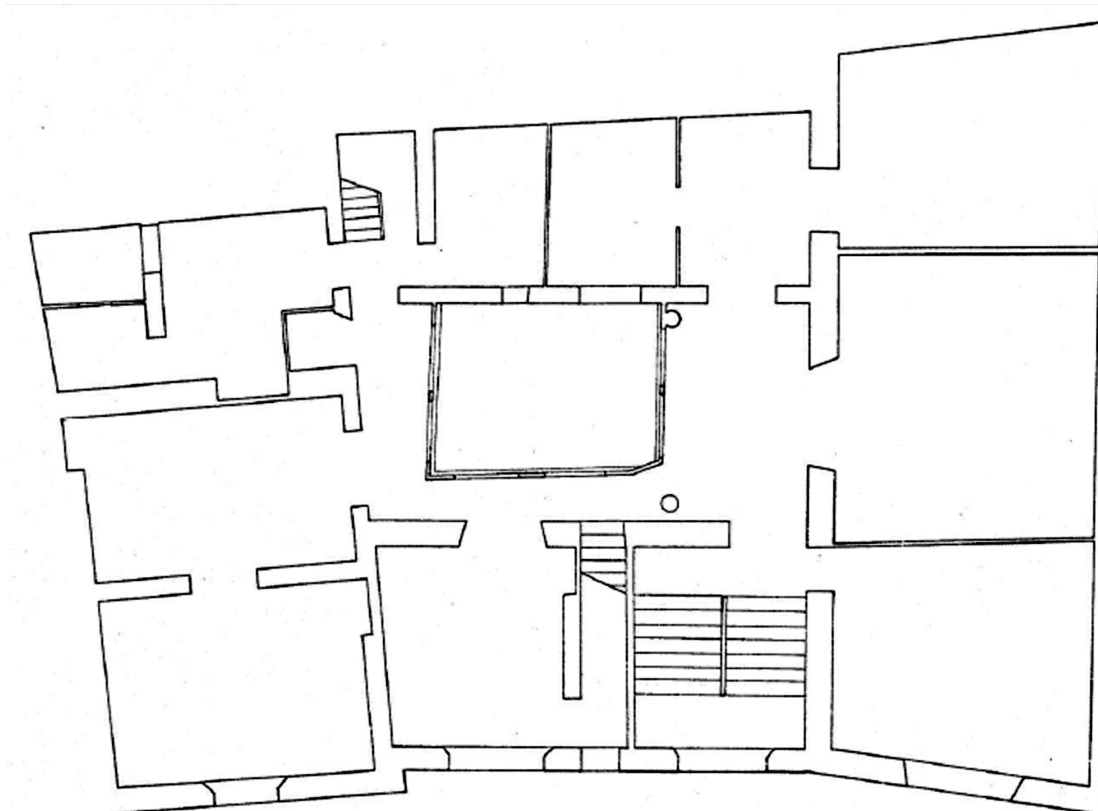


Fig 7-17: Gano 4

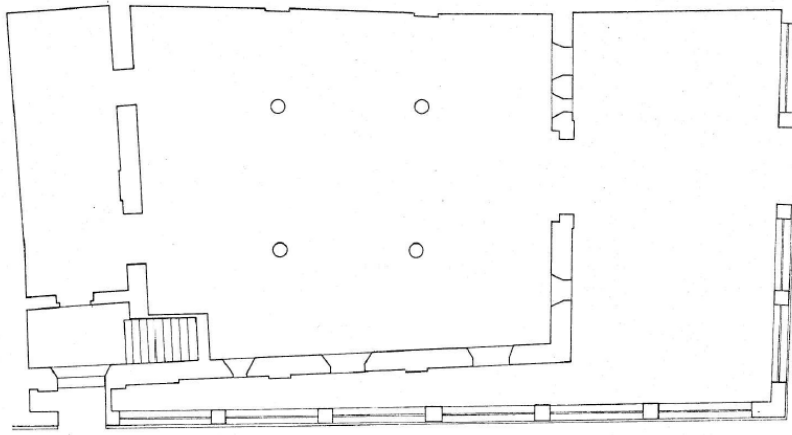


Fig 7-18: General Castaño

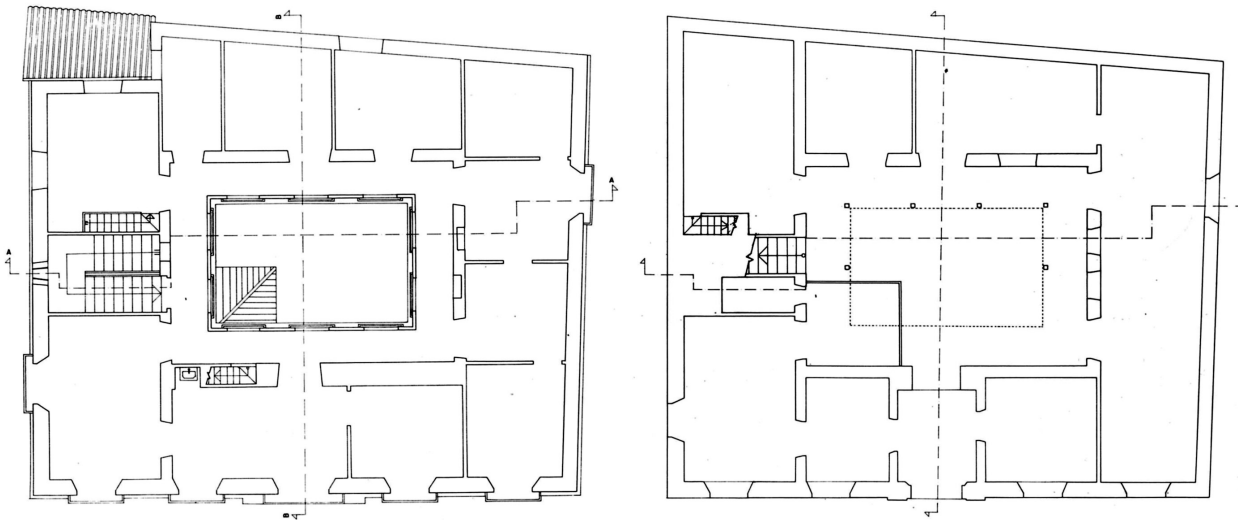


Fig 7-19: Matahacas 14

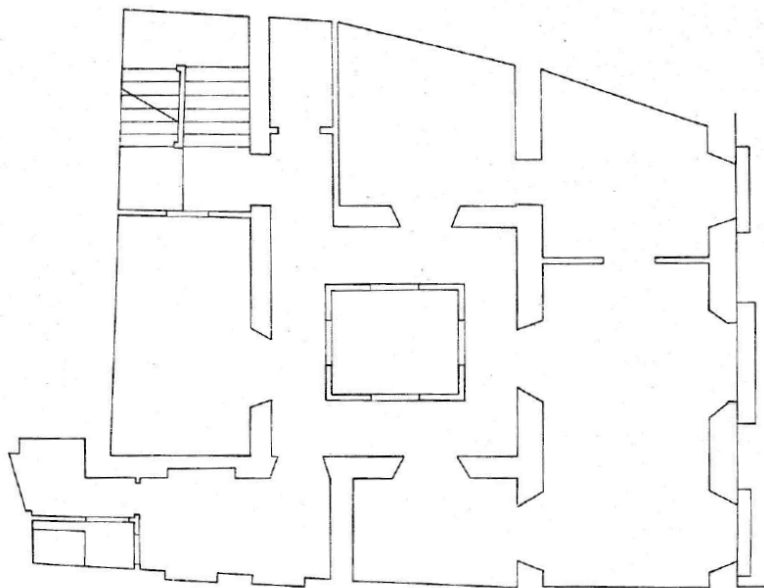


Fig 7-20: Plaza de San Marcos 13

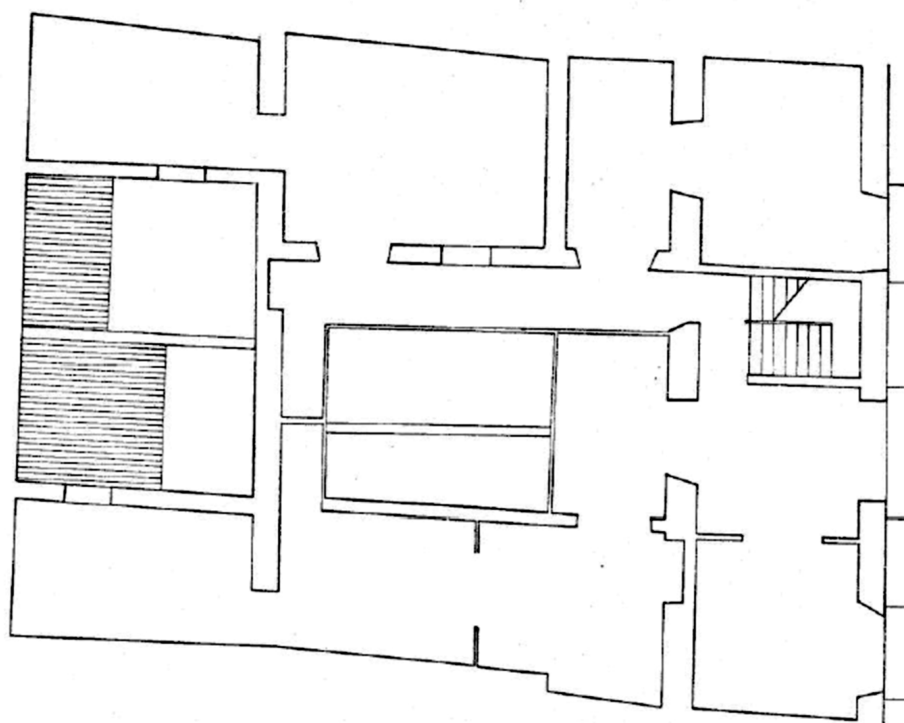


Fig 7-21: *Sagasta 1*

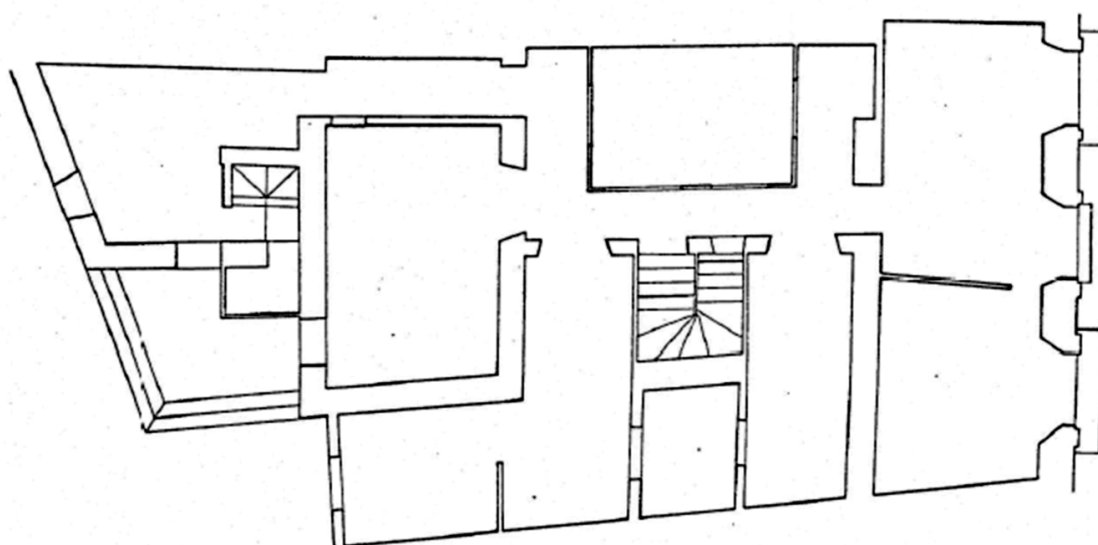


Fig 7-22: *San Roque*

Tras su análisis, se han esquematizado los siguientes tipos:

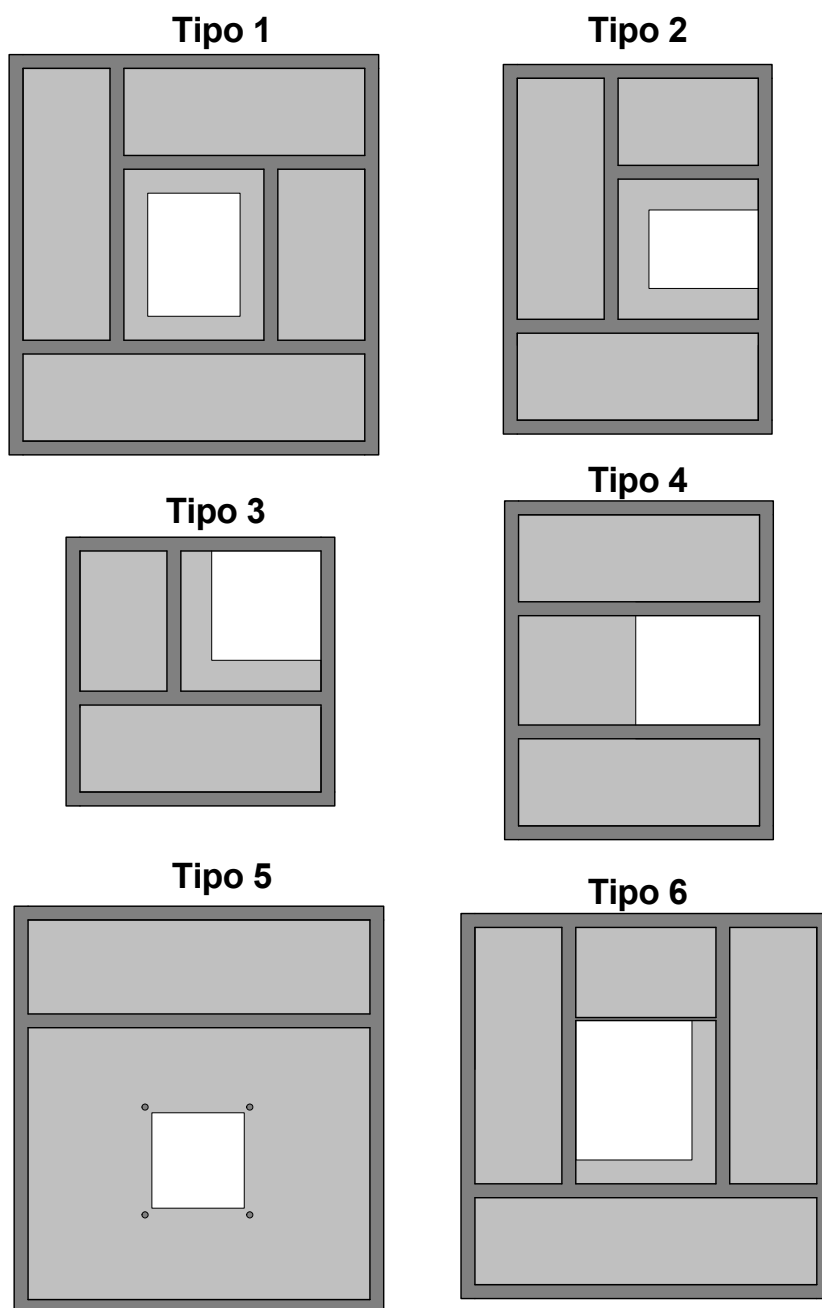


Fig 7-23: Tipos estructurales analizados

Tipo 1. Casa con patio central y cuatro galerías (ej: Abades 30, Matahacas 14, Pza. San Marcos 13, Sagasta 1, Gano 4 o Doncellas 23)

Tipo 2. Casa con patio adosado a la medianera (ej: Archeros 1, Bustos Tavera 41, Cenicero 2, Churuca 1, Cristo del Buen Viaje 16, Dña. María Coronel 15 o Doncellas 8)

Tipo 3. Casa con patio y dos galerías (ej: Artemisa 9, Alameda de Hércules 93, Alameda de Hércules 97, Goles 14)

Tipo 4. Casa con patio central y crujiás paralelas a fachada (ej: Corral del Rey 4, Enladrillada 42, Sagasta 5)

Tipo 5. Casa con patio central sin muros (ej: General Castaño)

Tipo 6. Casa con patio central y crujiás traseras perpendiculares a fachada (ej: Alfarería 15 o Calatrava 30)

El tipo 5 es poco habituales pero, aun así, se ha seleccionado porque se ha considerado que puede tener gran sensibilidad a las lesiones, debido a la falta de muros.

4.1.2 Dimensiones espaciales

Como se ha expuesto en el punto 2.3.4 las fórmulas simplificadas del periodo fundamental adoptadas por la mayoría de las normas sísmicas internacionales marcan una relación entre el periodo y la relación entre la longitud en planta de los muros y la altura. Pero dada la variabilidad de los resultados de estas fórmulas, que puede apreciarse en la Tabla 4–1, parece interesante profundizar en este problema y comprobar en cada uno de los seis tipos la sensibilidad de esta relación. Para el estudio de cada tipo se plantean tres variantes dimensionales. En estas variantes se mantendrá la altura y se modificarán las dimensiones de la crujía y el tamaño de la parcela.

Tabla 7–1: Resultados para un edificio de dos planta de altura, con dimensión en planta de 13*14 m y muros de carga y de atado de 60 cm y de 29 cm de espesor respectivamente (equivalente al Tipo 1, variante 2).

Norma	Artículo	Fórmula simplificada		Fórmula extendida	
		T (s)	F (Hz)	T (s)	F (Hz)
NCSE-02	3.7.2.2	0,0502	19,92		
Eurocódigo 8	4.3.3.2.2	0,2152	4,65	0,0327	30,58
ATC 3-06	4.2.2	0,3069	3,26		
NZSEE	App. 4E.8.1	0,269	3,72		
NEHRP (FEMA 450)	5.2.2	0,21	4,76	0,0138	72,46
CIRSOC 102	Anexo III.1.5	0,0502	19,92		
UBC	1630.2.1	0,21	4,76		
ASCE/SEI 7-10	12.8.2	0,21	4,76	0,0138	72,46
E.030 (Perú)	17.2	0,1167	8,57		

4.1.3 Influencia del espesor y características mecánicas de los muros

Se han estudiado dos parámetros fundamentalmente: el espesor de los muros y el módulo de elasticidad del material.

4.1.3.1 Espesor de los muros

En muchas de las fórmulas simplificadas del periodo fundamental no se ha incluido el parámetro espesor de los muros. Pero se ha considerado que al ser un parámetro que afecta directamente a la rigidez del muro, es interesante hacer un análisis de sensibilidad.

Se realizarán cálculos en los distintos tipos, efectuando dos variaciones: en la primera supondremos que los muros de carga tienen 2 pies de espesor y los muros de atado 1 pie de espesor. En la segunda supondremos que todos los muros tienen 1 pie de espesor.

Como se reflejó en el punto “3.3.2 Muros”, el formato más común para los ladrillos hasta el siglo XX es 29x14x5.

4.1.3.2 Módulo de elasticidad de la obra de fábrica

Para el estudio de la influencia del módulo de elasticidad del material se ha estudiado la normativa internacional y una amplia bibliografía.

El módulo de elasticidad de la fábrica depende de las características mecánicas de sus componentes, así como de las proporciones geométricas de las piezas y de la relación pieza-mortero.

Atendiendo a las directrices del CTE SE-F³ y del Eurocódigo 6⁴, el módulo de elasticidad secante instantáneo, E , de una fábrica puede tomarse igual a $1000 \cdot f_k$

Resistencia de la fábrica

Pero la resistencia de la fábrica es un parámetro difícil de prever, que depende, entre otros parámetros, de la resistencia de las piezas y de la resistencia del mortero. Para una fábrica de ladrillo nueva, tanto la norma española como el Eurocódigo 6 sugieren la siguiente fórmula de estimación:

$$f_k = K f_b^{0,65} f_m^{0,25} \text{ N/mm}^2$$

Si tomamos una resistencia del ladrillo de 5.00 MPa y del mortero de 2.50 MPa y un coeficiente K (según CTE) de 0.6 tendremos un valor máximo para f_k de 2.15 MPa

Para una hipótesis menos conservadora, con una resistencia del ladrillo de 10.00 MPa y del mortero de 5.00 MPa y un coeficiente K (según CTE) de 0.6 tendremos un valor máximo para f_k de 4.01 MPa

Dependiendo de la calidad de los ladrillos y del mortero, se podría llegar a resistencias de 10 MPa, como puede comprobarse en la siguiente tabla, extraída del CTE DB SE-F

Si revisamos la tabla 5.1 de la anterior norma NBE FL-90, podemos comprobar que la resistencia característica variaba entre 1.2 MPa y 5.6 MPa.

3 Dirección General de Arquitectura. (2006). Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-F. Seguridad estructural: Fábrica. Art. 4.6.5 *Deformabilidad*.

4 Comité técnico AEN/CTN 140. (n.d.). Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica. EN1996-1-1. Reglas Generales y Reglas para Edificación. Art. 3.8.2 *Módulo de elasticidad*.

Tabla 4.4 Resistencia característica a la compresión de fábricas usuales f_k (N/mm²)

Resistencia normalizada de las piezas, f_b (N/mm ²)	5		10		15		20		25
Resistencia del mortero, f_m (N/mm ²)	2,5	3,5	5	7,5	7,5	10	10	15	15
Ladrillo macizo con junta delgada	-	-	3	3	3	3	3	3	3
Ladrillo macizo	2	2	4	4	6	6	8	8	10
Ladrillo perforado	2	2	4	4	5	6	7	8	9
Bloques aligerados	2	2	3	4	5	5	6	7	8
Bloques huecos	1	1	2	3	4	4	5	6	6

Todo esto es atendiendo a normativa para fábrica nueva, pero para fábrica existente la variabilidad documentada es bastante amplia. Así, en Martínez, Martín-Caro y León⁵ se discute esta cuestión llegando a exponer una relación entre la resistencia de la fábrica y la del ladrillo de entre 0.3 y 0.2 o menos⁶, y resistencias de la fábrica hasta 27.65 MPa⁷

Para ilustrar la dificultad del tema y dispersión de resultados que podemos encontrar, se adjunta la tabla siguiente⁸:

Tabla 7–2: Tabla comparativa entre los resultados de ensayo en probetas de fábrica de ladrillo y las predicciones analíticas.

Research ^a	Experimental values (MPa)			Predicted values of f'_m (MPa)				
	f_b	f_j	f'_m	Present study Eq. (12)	Eurocode6 (CEN 1996)	Dayaratnam (1987)	Bennett et al. (1997)	MSJC (2002)
Sarangpani 1	8.2	3.1	2.3	2.5 {10.3} ^b	2.7 {17.6}	1.4 {65.9}	2.5 {7.0}	4.4 {91.2}
Tomažević	10.0	0.5	2.0	1.6 {28.2}	2.3 {12.7}	0.6 {225.2}	3.0 {50.0}	4.8 {137.9}
Sarangpani 2	10.7	4.1	2.9	3.2 {9.0}	3.4 {18.9}	1.8 {59.2}	3.2 {10.7}	4.9 {68.9}
Sarangpani 2	10.7	10.6	3.2	4.3 {33.6}	4.4 {36.2}	2.9 {9.6}	3.2 {0.0}	4.9 {52.9}
Naraine	13.1	6.1	5.4	4.0 {36.2}	3.6 {49.2}	2.5 {119.7}	3.9 {37.4}	5.4 {0.4}
Tomažević	15.0	2.5	2.5	3.2 {27.4}	4.4 {75.5}	1.7 {48.5}	4.5 {80.0}	5.8 {130.3}
Rai ^c	17.0	9.9	7.3	5.3 {38.8}	5.8 {25.7}	3.6 {104.6}	5.1 {43.1}	6.2 {18.5}
Present	20.8	3.1	4.1	4.0 {2.4}	5.0 {20.8}	2.2 {85.7}	6.2 {52.2}	6.9 {68.7}
Present	20.8	15.2	6.6	6.7 {0.9}	7.4 {11.6}	4.9 {35.0}	6.2 {5.8}	6.9 {4.8}
Present	20.8	20.6	7.5	7.3 {2.2}	— ^d	5.7 {31.8}	6.2 {20.2}	6.9 {8.4}
Hendry	25.5	15.2	9.3	7.4 {26.4}	7.0 {32.7}	5.4 {71.8}	7.7 {21.6}	7.9 {18.3}
Binda	26.9	12.7	14.5	7.1 {103.3}	6.7 {117.9}	5.1 {185.3}	8.1 {79.7}	8.1 {78.2}
Ewing	34.0	15.7	15.6	8.6 {82.3}	9.4 {66.4}	6.4 {145.5}	10.2 {52.9}	9.6 {63.2}
McNary	101.7	3.4	29.9	9.0 {232.2}	14.2 {110.3}	5.1 {484.7}	30.5 {2.0}	23.1 {29.4}
McNary	101.7	13.7	32.5	14.0 {131.8}	20.1 {61.4}	10.3 {216.6}	30.5 {6.5}	23.1 {40.7}
McNary	101.7	26.4	40.9	17.3 {136.5}	— ^d	14.2 {187.0}	30.5 {34.1}	23.1 {77.1}
McNary	101.7	52.6	48.2	21.6 {123.6}	— ^d	20.1 {139.6}	30.5 {58.0}	23.1 {108.7}

^aSarangpani 1=Sarangapani et al. (2002), Tomažević=Tomažević (1999), Sarangpani 2=Sarangapani et al. (2005), Naraine=Naraine and Sinha (1989), Rai=Rai and Goel (1996), Hendry=Hendry (1998), Binda=Binda et al. (1988), Ewing=Ewing and Kowalsky (2004), McNary=McNary and Abrams (1985).

^bFigures in the { } bracket indicate the percent error between the experimental and predicted values.

^cReclaimed bricks from about 100 years old building in North America and 1:1:6 mortar were used in prisms.

^dEurocode6 (1996) is applicable only for masonry with mortar strength less than 20 MPa.

- 5 Martínez, J. L., Martín-Caro, J. A., & León, J. (2001). Comportamiento mecánico de la obra de fábrica. Monografía sobre el análisis estructural de construcciones históricas de fábrica. (D. de M. de los M. C. y T. de E. E.T.S.Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ed.)
- 6 Martínez, J. L., Martín-Caro, J. A., & León, J. op.cit., 2001, pag. 44
- 7 Martínez, J. L., Martín-Caro, J. A., & León, J. ibid, pag. 38
- 8 Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2007). Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 728–739. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728). Pag. 735.

Volviendo al módulo de elasticidad:

Con los valores antes expresados, que varían entre 1 MPa y 27 MPa y la formulación del módulo de elasticidad del CTE y del EC-6 tendríamos que el módulo de elasticidad secante instantáneo, E , de la fábrica podría estar entre 1.000 N/mm² y 27.000 N/mm².

Como puede apreciarse, la dispersión es enorme.

Los ensayos llevados a cabo por Shrive, Jessop y Khalil⁹ dan resultados para el módulo de elasticidad secante de entre 5800 y 7600 N/mm², centrando un poco el rango de posibilidades. Aun así, sigue tratándose de valores de una fábrica de nueva ejecución.

Se considera que la fórmula propuesta por el CTE y el Eurocódigo 6 para el módulo de elasticidad es excesivo para edificios antiguos. El Code UIC 778-3¹⁰ sugiere el uso de la fórmula:

$$E = E_b \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha\beta}$$

Siendo, $\alpha = h_m/h_b$ (relación entre el alto de las piezas y el espesor de los tendeles) y $\beta = -E_b/E_m$

Zavalis, R., Jonaitis, B., & Lourenço, P. B.¹¹ estudian fórmulas similares.

Los valores habituales de β varían entre 1 y 15 y α entre 0.33 y 1.

En la tabla siguiente podemos encontrar los valores orientativos del parámetro α

Tabla 7–3: Tabla de valores orientativos del parámetro α .¹²

Monumento y época	Dimensiones del ladrillo alto: tizón: soga [mm]	Espesor del tendel h_m [mm]	$\alpha = h_m/h_b$
Torre de la iglesia (en ruinas) de la plaza Agustín de Lara en Madrid. Barroco. S XVII. Ladrillo.	60 : 210 : 280	20 a 30	0.33 a 0.50
Torre de los Lujanes, Madrid. Gótico Mudejar. S. XV (restaurada en 1910). Ladrillo	40 : 130 : 300	30 a 40	0.75 a 1.00
Torre de San Ginés, Madrid. Renacentista, S XV. Ladrillo	30 a 40 : - : 300	30	1.00 a 0.75
Torre de la Iglesia de la Asunción en Móstoles. Mudejar, S. XIV. Ladrillo	35 a 40 : - : 270	35 - 40	1.00

9 Shrive, N. ., Jessop, E. ., & Khalil, M. . (1976). Stress-Strain Behaviour of Masonry Walls. In *Vth International Brick Masonry Conference* (pp. 453–458). Pag. 456. Tabla 3.

10 Union Internationales des Chemins de Fer. (1995). CODE UIC 778-3. Recommendations pour l'évaluation de la capacité portante des ponts-voûtes existants en maçonnerie et béton.

11 Zavalis, R., Jonaitis, B., & Lourenço, P. B. (2014). Analysis of bed joint influence on masonry modulus of elasticity. In *9th International Masonry Conference*.

12 Martínez, J. L., Martín-Caro, J. A., & León, J. op.cit., 2001, pag. 45

Si estimamos unos valores típicos para ladrillo $\alpha=0.25$ y $\beta=10$ se tienen para la fábrica valores orientativos del módulo de deformación longitudinal $E \approx 0.35 E_b$ ¹³

Tabla 7–4: Tabla de valores orientativos del módulo de elasticidad del ladrillo $E_b [N/mm^2]$.¹⁴

Tipo de ladrillo	UIC [12]	Ponts en maçonnerie [13]
Ladrillo Blando	1,000 – 5,000	
Ladrillo Medio	5,000 – 10,000	5,000 – 25,000
Ladrillo Duro	10,000 – 15,000	
Ladrillo Clinker	15,000 – 20,000	

Los ensayos de Powell y Hodgkinson en fábrica de ladrillo arrojan resultados del módulo de elasticidad tangente de entre 4960 N/mm² y 18230 N/mm².

Para el caso de Sevilla, en el trabajo de Pérez Gálvez¹⁵ se han analizado muestras de varios edificios, encontrando:

- Ladrillo: f_b entre 16,2 MPa y 4 MPa lo que indica una gran dispersión de resultados (incluso dentro del mismo edificio)¹⁶
- Los morteros son de cal, con dosificaciones en volumen cal/árido en torno a $1/3$ ¹⁷.
- Los espesores de mortero varían entre 2 y 4 cm. Solo se han encontrado espesores inferiores en algunos edificios singulares.

Para comprobar la influencia del módulo de elasticidad, realizaremos los cálculos con tres configuraciones:

- a) Ladrillo blando con tendel grueso y mortero muy blando, que con la fórmula del UIC 778-3 da un E de 727 N/mm². Redondearemos a **700 N/mm²**.
- b) Ladrillo medio con tendel grueso y mortero blando, que con la misma fórmula da un E de **1.500 N/mm²**.
- c) Ladrillo medio con tendel grueso y mortero de dureza media, que con la misma fórmula da un E de **2.500 N/mm²**.

13 Martínez, J. L., Martín-Caro, J. A., & León, J. *ibid*, 2001, pag. 41

14 Martínez, J. L., Martín-Caro, J. A., & León, J. *ibid.*, 2001, pag. 16

15 Pérez Gálvez, F. (2004). Las obras de fábrica en la arquitectura doméstica sevillana de los siglos XVIII y XIX: características constructivas y parámetros resistentes. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Sevilla.

16 Pérez Gálvez, F., *ibid*, 2004, pag. 85

17 Pérez Gálvez, F., *ibid*, 2004, pag. 100

4.1.4 Influencia del forjado y sus características geométricas y mecánicas. El efecto diafragma

Habitualmente, al modelar las estructuras, el forjado se considera un diafragma rígido. El comportamiento dinámico de los edificios estudiados se ve muy afectado por la rigidez del forjado en su plano, pero evidentemente el efecto diafragma del forjado va a influir de forma notoria en la respuesta dinámica del edificio. Este aspecto está demostrado en la amplia bibliografía específica (Tena-Colunga & Abrams^{18 19}; Brignola, Pampanin & Podestà^{20 21}), o en la normativa internacional (ASCE/SEI 41-06 2007; FEMA 356 2000).

Tal como menciona Brignola, Pampanin & Podestà²²:

...la observación del daño en pasados terremotos ha confirmado el efecto de la flexibilidad de los diafragmas en mecanismo de colapso y, en general, en la respuesta total.

Un diafragma excesivamente flexible y mecanismos de conexión inadecuados entre los muros y el forjado pueden conducir a un desplazamiento excesivo a nivel del forjado, lo que puede causar el vuelco de los muros perimetrales.

El efecto de diafragma elástico provoca movimientos como el de la Fig 4–24

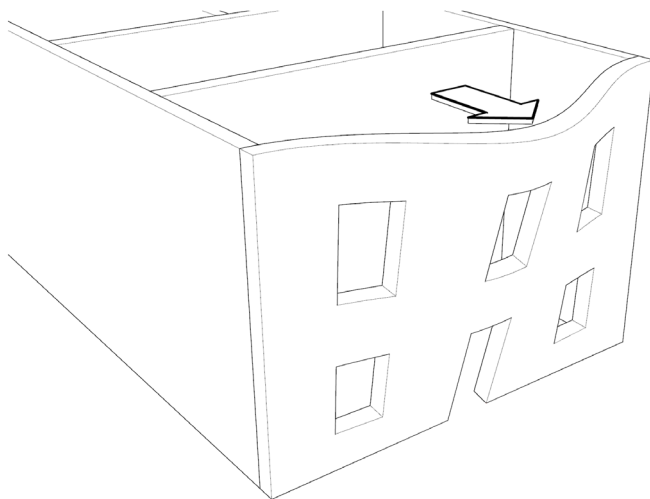


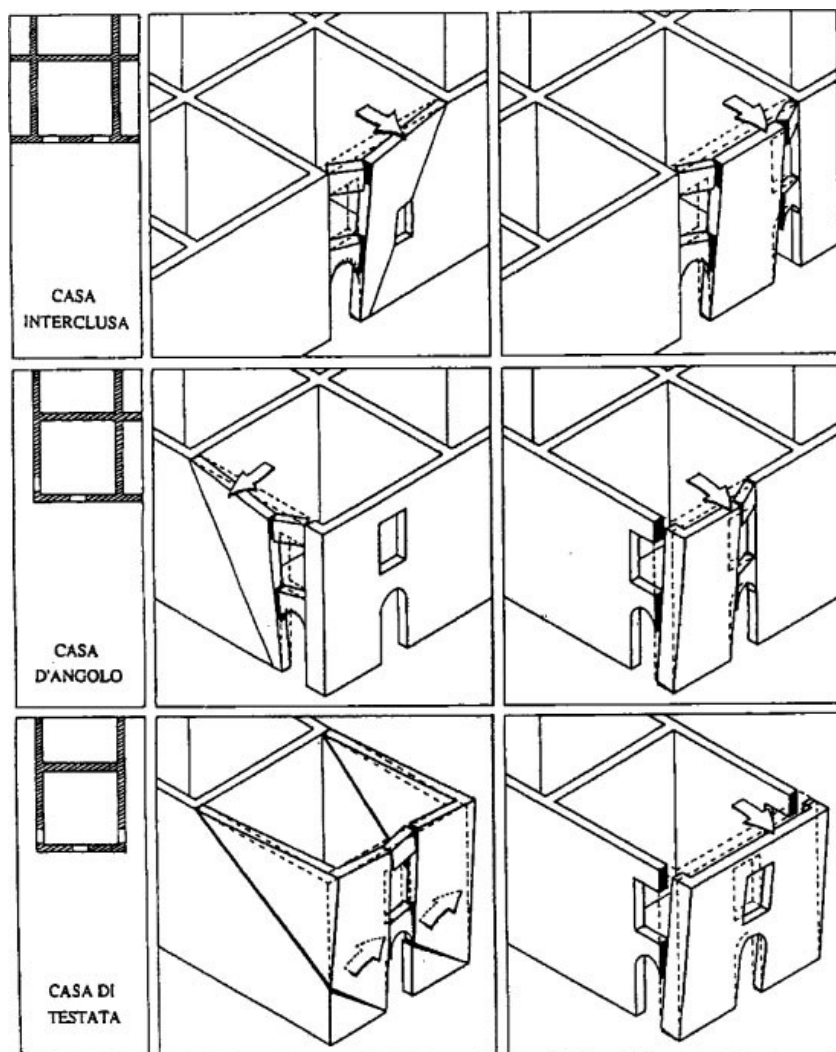
Fig 7–24: Efecto desestabilizador del diafragma elástico del forjado en el muro
Imagen propia.

-
- 18 Tena-Colunga, A., & Abrams, D. P. (1996). Seismic Behavior of Structures with Flexible Diaphragms. *Journal of Structural Engineering*, 122(April), 439–445. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:4(439) [16]
- 19 A. Tena-Colunga, "Seismic Evaluation of Unreinforced Masonry Structures with Flexible Diaphragms," *Earthq. Spectra*, vol. 8, no. 2, pp. 305–318, 1992.
- 20 Brignola, A., Pampanin, S., & Podestà, S. (2009). Evaluation and control of the in-plane stiffness of Timber floor for the performance-based retrofit of URM buildings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 42(3), 204–221
- 21 Brignola, A., Pampanin, S., & Podestà, S. (2012). Experimental Evaluation of the In-Plane Stiffness of Timber Diaphragms. *Earthquake Spectra*, 28(4), 1687–1709. doi:10.1193/1.4000088
- 22 Brignola, A., Pampanin, S., & Podestà, S., op.cit (2009), pag. 208

En la Fig 4–25 podemos encontrar los distintos mecanismos de fallo que pueden producirse en un edificio con estructura de fábrica debido a las acciones horizontales²³.

Si unimos este efecto a una posible rotura de la unión muro de carga-muro de atado, el comportamiento de una casa interclusa puede cambiar para parecerse al comportamiento de una casa de ángulo (ver Fig 4–26)

Fig 7–25: Mecanismos de fallo de edificios en una manzana



23 Binda, L., & Saisi, A. (2005). Research on historic structures in seismic areas in Italy. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), 71–85. doi:10.1002/pse.194, pag. 82

Fig 7-26: Efecto desestabilizador del diafragma elástico del forjado en el muro en caso de rotura de la unión muro de carga-muro de atado
Imagen propia.

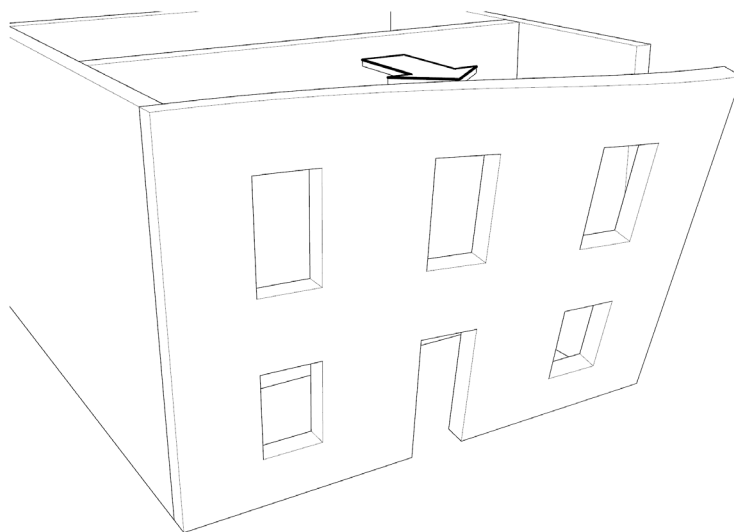


Tabla 7-6: FEMA 356. Tabla rigidez esperada en el plano (efecto diafragma) para distintos tipos de forjados de madera.

Table 8-2 Default Expected Strength Values for Wood Diaphragms

Diaphragm Type ¹		Property	
		Shear Stiffness— G_d (lb/in)	Yield Capacity (Q_{CE}) (plf)
Single Straight Sheathing ⁵		2,000	120
Double Straight Sheathing	Chorded	15,000	600
	Unchorded	7,000	400
Single Diagonally Sheathing	Chorded	8,000	600
	Unchorded	4,000	420
Diagonal Sheathing with Straight Sheathing or Flooring Above	Chorded	18,000	900
	Unchorded	9,000	625
Double Diagonal Sheathing	Chorded	18,000	900
	Unchorded	9,000	625
Wood Structural Panel Sheathing ²	Unblocked, Chorded	8,000	-
	Unblocked, Unchorded	4,000	-
Wood Structural Panel Overlays on: a. Straight or Diagonal Sheathing ³ or b. Existing Wood Structural Panel Sheathing ⁴	Unblocked, Chorded	9,000	450
	Unblocked, Unchorded	5,000	300
	Blocked, Chorded	18,000	-
	Blocked, Unchorded	7,000	-

1. As defined in Section 8.6.

2. See Section 8.6.8 for shear stiffness and yield capacity of wood structural panel diaphragms.

3. See Section 8.6.9 for yield capacity of wood structural panel overlays on straight or diagonal sheathing.

4. See Section 8.6.10 for yield capacity of wood structural panel overlays on existing wood structural panel sheathing.

5. For single straight sheathing, yield capacity shall be multiplied by 1.5 when built-up roofing is present. The value for stiffness shall not be changed.

El título 8.6 del FEMA 356²⁴ o el 8.5 del código ASCE/SEI 41-06²⁵ estudian de igual manera el efecto diafragma de forjados de madera.

En estos códigos, se establece una rigidez equivalente del diafragma G_d , que se define como el módulo de rigidez transversal equivalente G_{eq} multiplicado por el espesor del diafragma.

Según la tabla 8-2 de dichos códigos (ver tabla en Tabla 4-6), la rigidez transversal equivalente esperada para un forjado con tablazón de madera de una sola capa debería ser de 2000 lb/in, (350 N/mm).

Si dividimos este valor por el espesor obtenemos G_{eq} en MPa. Por lo que con un tablero de 2 cm: $G_{eq} = 17.5$ MPa

En Brignola, Pampanin & Podestà²⁶ se presenta un estudio comparativo entre el enfoque del código ASCE, el NZSEE y el código italiano NTC 2008.

Además se exponen los resultados de un modelo teórico y experimental, basado en la rigidez del forjado y la de los conectores laterales (ver Fig 4-27)

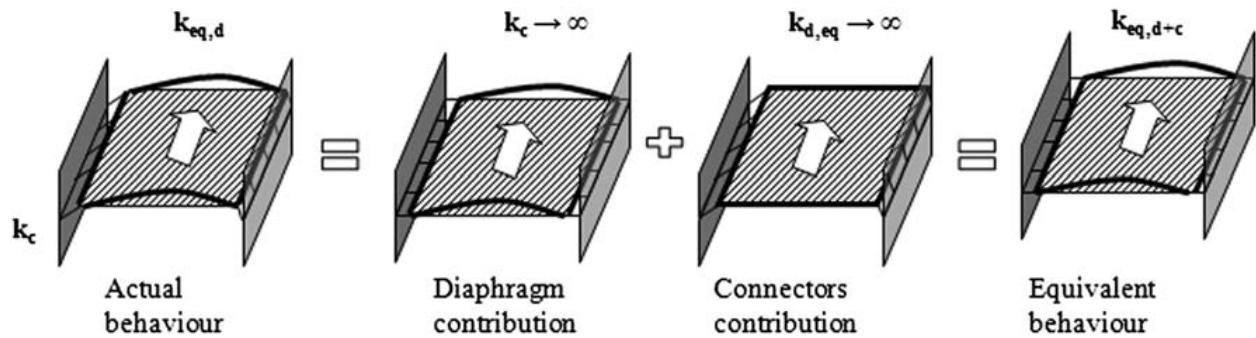


Fig 7-27: Esquema de contribución de los conectores y de la rigidez de diafragma a la rigidez del conjunto
Tomada de Brignola, Pampanin & Podestà, 2012

Para definir la rigidez del conjunto del forjado en su plano, se propone la siguiente ecuación:

$$G_{c+d} = \frac{L}{4B} \cdot k_{eq,c+d} = \frac{L}{4B} \cdot \left(\frac{1}{k_{eq,d}} + \frac{1}{k_{eq,c}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{G_d} + \frac{4B}{Lk_c} \right)^{-1}$$

24 FEMA (Federal Emergency Management Agency), & ASCE (American Society of Civil Engineers). FEMA 356 (2000)

25 ASCE (American Society of Civil Engineers). (2007). ASCE/SEI 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.

26 Brignola, A., Pampanin, S., & Podestà, S., op.cit (2012), pag. 1688 a 1691

Tomando un modelo matemático como el de la Fig 4–28²⁷, la rigidez del conjunto puede expresarse de acuerdo a la ecuación:

$$G_d = \frac{WL}{8B} \cdot \frac{1}{\Delta} = \frac{4b^2 E_B t_B}{5L^2} + \frac{32b^3 E_B t_B}{5L^2 B} + \frac{8b^3 E_C t_C}{L^2 B}$$

Donde:

- E_b es el módulo de elasticidad de la tablazón de madera
- b_c y t_c son las dimensiones del zuncho metálico frontal
- E_c es el módulo de elasticidad del acero
- b es el ancho de la tablazón
- t_b es el canto de la tablazón
- L y B son las dimensiones del diafragma

Si no hay encadenado de borde:

$$G_d = \frac{4b^2 E_B t_B}{5L^2} + \frac{32b^3 E_B t_B}{5L^2 B}$$

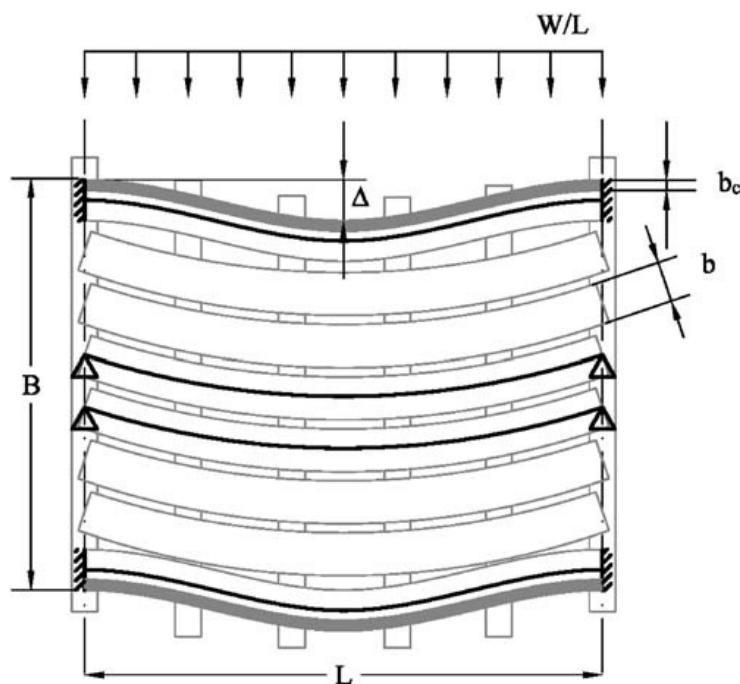


Fig 7–28: Modelo matemático de la rigidez de diafragma

Tomada de Brignola, Pampanin & Podestà, 2012

²⁷ Brignola, A., Pampanin, S., & Podestà, S., *ibidem* (2012), pag. 1705

Para un forjado con las siguientes condiciones:

Canto tablero: $t_B := 2 \text{ cm}$

Ancho de la tabla: $b := 20 \text{ cm}$

Longitud del diafragma: $L := 8 \text{ m}$

Ancho del diafragma: $B := 3 \text{ m}$

Módulo de elasticidad de la madera: $E_B := 10000 \text{ MPa} = 10 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$

Tendremos que²⁸

Módulo de rigidez transversal: $G_d := \frac{4 \cdot b^2 \cdot E_B \cdot t_B}{5 \cdot L^2} + \frac{32 \cdot b^3 \cdot E_B \cdot t_B}{5 \cdot L^2 \cdot B} = 153,3333 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

$G_d = 0,1533 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ Muy parecido a 0.35kN/mm de la tabla del ASCE/SEI 41-06

Dividiendo por el espesor, obtenemos el módulo transversal de rigidez equivalente: $G_{eq} := \frac{G_d}{t_B} = 7,6667 \text{ MPa}$

Como el módulo de rigidez transversal de la madera es: $G_M := 3076,9 \text{ MPa}$

El factor de minoración será: $F_{12} := \frac{G_{eq}}{G_M} = 0,0025$

En el caso que nos ocupa, para simular un forjado de viguetas y tabla simple de madera, hemos usado un modificador F12 de 0,0025.

Para simular forjados con revoltón de rasilla y con bovedilla sin capa de compresión, hemos usado un modificador F12 de 0,01. Para estos casos no hemos encontrado referencias, y se ha realizado un análisis de sensibilidad.

Las distintas normas consultadas prevén distintos sistemas de conexión muro-forjado. En los casos habituales en Sevilla, la conexión entre el forjado y los muros de atado se realiza directamente por rozamiento, no existiendo elementos mecánicos de fijación.

²⁸ Resultados generados mediante hoja de cálculo de elaboración propia.

4.1.5 Influencia de la manzana

Dentro de los parámetros de estudio, uno de los aspectos más interesante es la influencia del resto de edificios de una manzana en los resultados dinámicos de una construcción. Dicha influencia de los edificios colindantes en el comportamiento estructural y en la propuesta de reparación de

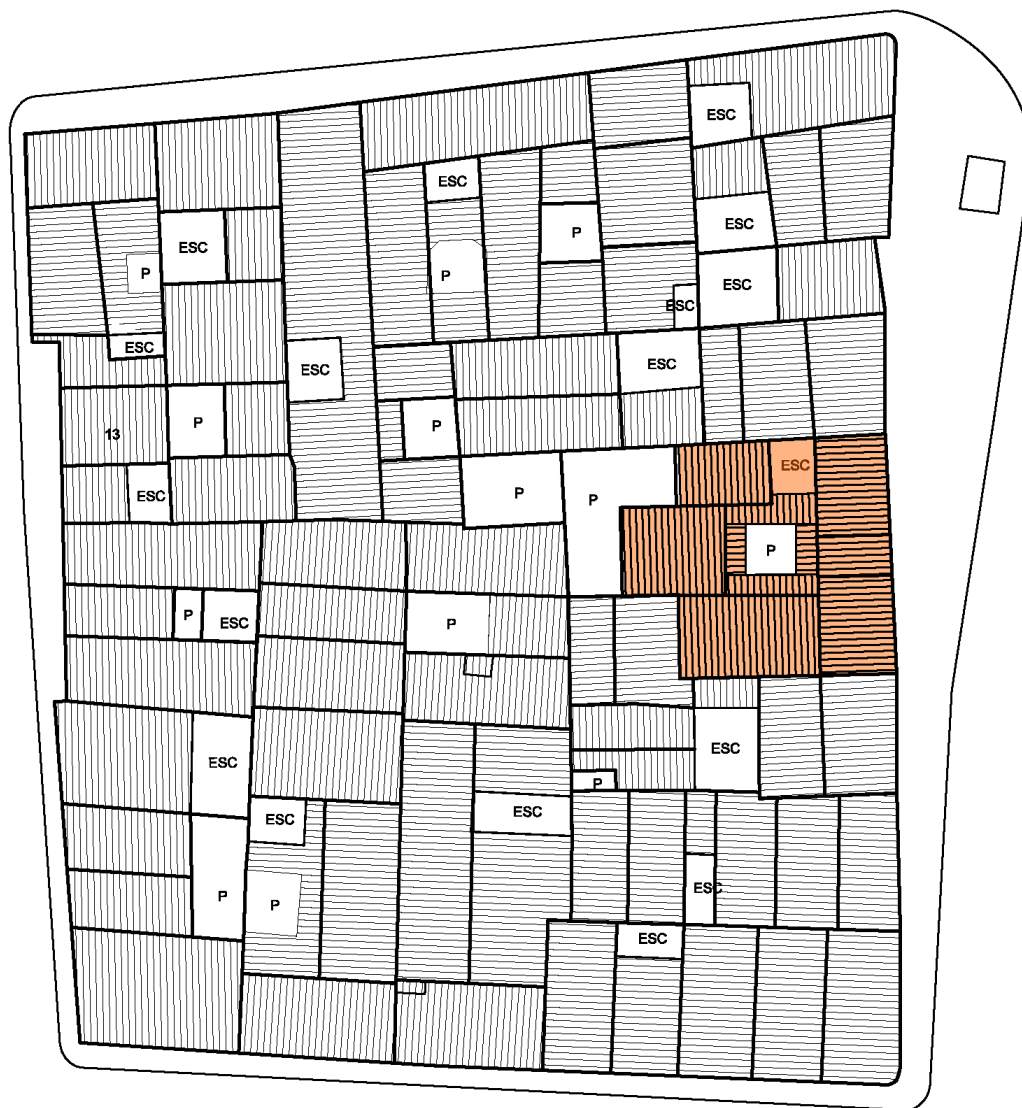


Fig 7–29: Esquema de la manzana estudiada, con indicación de la situación del edificio seleccionado.

un edificio ha sido estudiado por Binda y Saisi^{29,30}, Da Porto³¹, o Valluzzi^{32,33}. Esta tesis doctoral se apoya, para tomar algunas decisiones, en las conclusiones de Da Porto.

Se analizará esta influencia y, en particular, las siguientes cuestiones:

- De los resultados modales de un edificio, ¿Cuáles se ven modificados por la posición de éste dentro de la manzana?
- ¿Cuánto cambian los resultados entre un análisis con el edificio aislado y con el edificio dentro de una manzana?
- ¿Se ven afectados los resultados en edificios dañados debido a la inclusión del resto de la manzana?

Todas estas cuestiones se estudiarán en combinación con diversas soluciones de forjado y con el edificio principal en dos estados: con la estructura íntegra y con lesiones importantes que afectan a la estabilidad del mismo. En concreto se estudiará, como se describió anteriormente, el caso de que exista una grieta importante en la unión entre los muros de carga de primera crujía y los dos muros medianeros.

Se realizarán diversos análisis dinámicos de un edificio situado en el interior de una manzana. Para ello, se ha elegido una manzana de tipo medio y se ha seleccionado, dentro de ésta, un edificio situado en la zona central de uno de los lindes de la manzana (ver Fig 4–29).

El edificio elegido se ajusta al tipo estructural objeto del proyecto de investigación: es un edificio de dos plantas con estructura de fábrica de ladrillo. Tiene una primera crujía paralela a fachada, un patio central con galería perimetral, con dos crujías laterales perpendiculares y una última crujía trasera perpendicular a fachada (ver Fig 4–30).

El análisis de las características dinámicas se llevará a cabo con la ayuda del programa informático Sap2000 mediante el método de los elementos finitos (MEF). En todos los modelos, se discretizarán los muros y forjados mediante elementos superficiales (tipo *shell*) y las vigas con elementos lineales (tipo *frame*). En las Fig 4–31 y Fig 4–32 se representan los modelos de elementos finitos del edificio aislado y de la manzana completa.

29 L. Binda and A. Saisi, “Knowledge of the building, on site investigation and connected problems,” in Eurocode 8 perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 2009, pp. 213–224.

30 L. Binda and A. Saisi, “Research on historic structures in seismic areas in Italy,” Prog. Struct. Eng. Mater., vol. 7, no. 2, pp. 71–85, Apr. 2005.

31 F. da Porto, M. Munari, A. Prota, and C. Modena, “Analysis and repair of clustered buildings: Case study of a block in the historic city centre of L’Aquila (Central Italy),” Constr. Build. Mater., vol. 38, pp. 1221–1237, Jan. 2013.

32 M. R. Valluzzi, “On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation,” Mater. Struct., vol. 40, no. 7, pp. 723–743, Oct. 2006.

33 M. R. Valluzzi, G. Cardani, L. Binda, and C. Modena, “Seismic vulnerability methods for masonry buildings in historical centres: validation and application for prediction analyses and intervention proposals,” in 13 th World Conference on Earthquake Engineering, 2004, no. 2765.

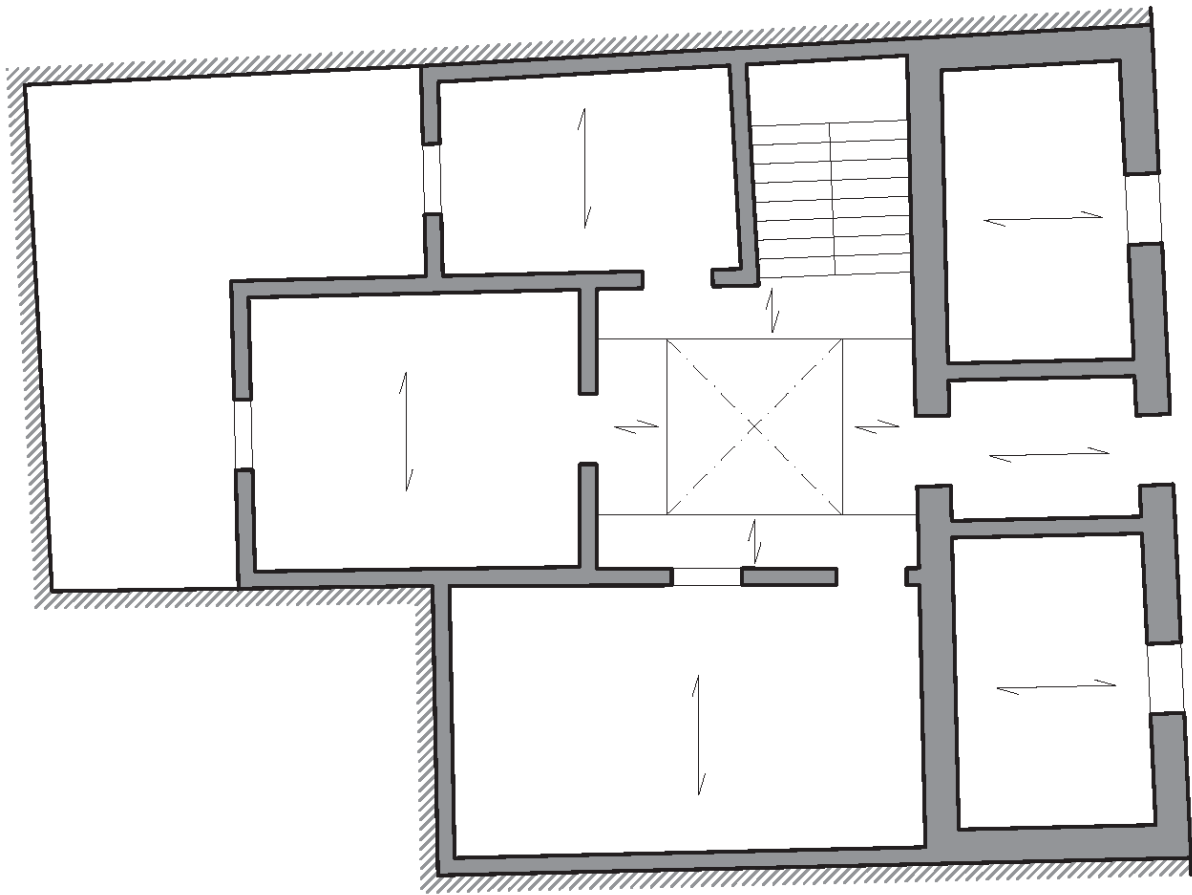


Fig 7-30: Plata esquemática del edificio estudiado.

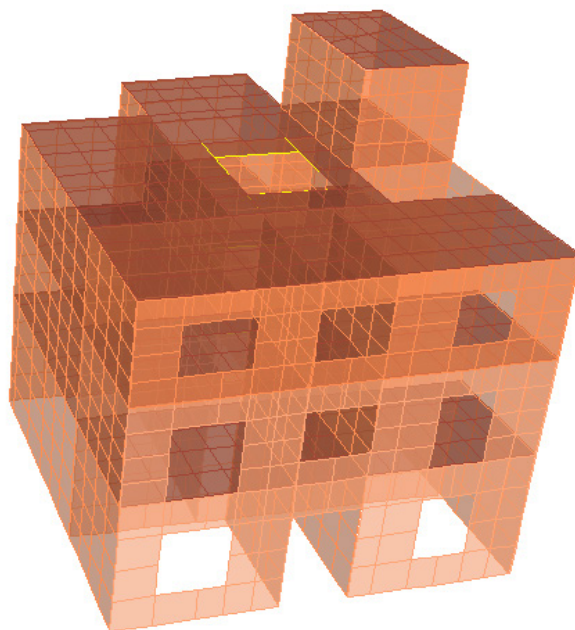


Fig 7-31: Volumetría del modelo de elementos finitos del edificio aislado.

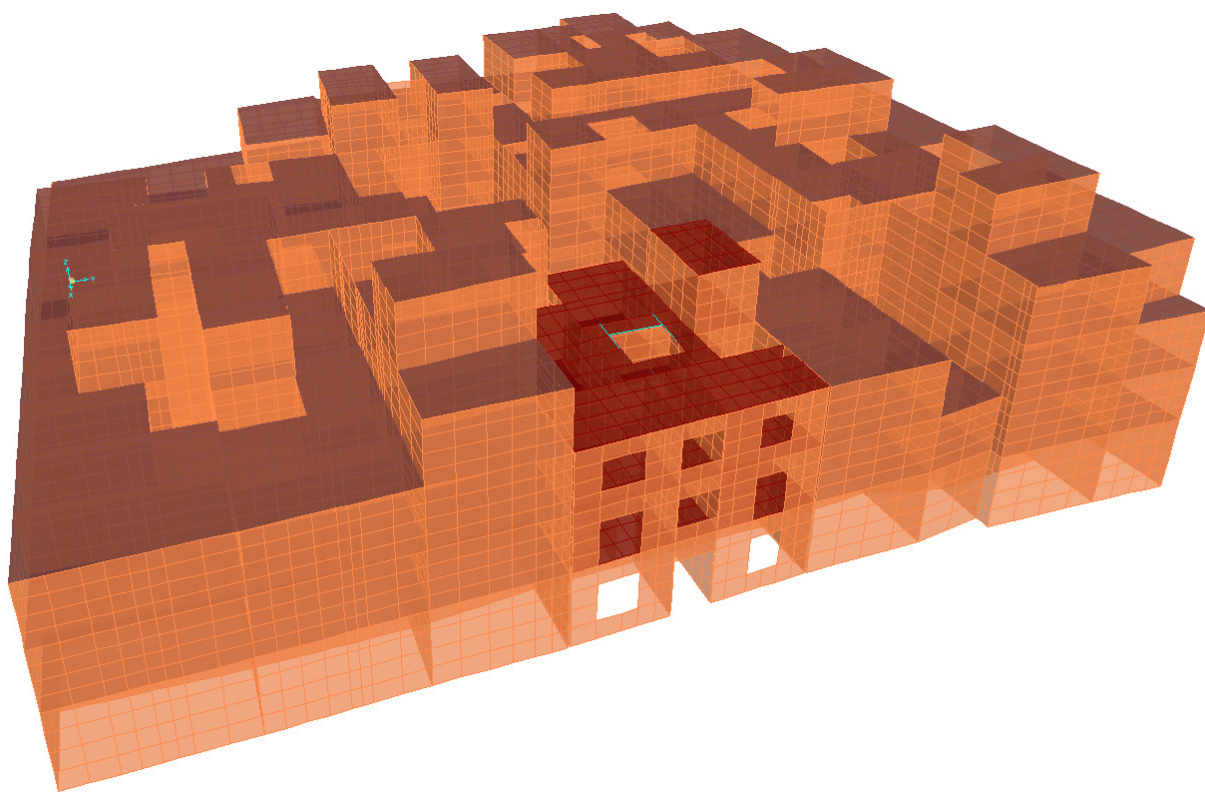


Fig 7-32: Volumetría del modelo de elementos finitos de la manzana.

Se desconectarán los muros de los forjados y los encuentros entre muros de carga y de atado, de forma que sea fácil simular la transmisión de acciones entre forjados y muros de carga, la desconexión entre forjado y muro de atado o la aparición de grietas entre muros. Para ello, podrán usarse vinculaciones (tipo *weld*) que permiten definir el tipo de esfuerzo que se transmite entre nodos (ver Fig 4-33).



Fig 7-33: Forjado con viguetas y tablazón de madera.

Imagen propia.

Para los muros de carga se aplicará una sección de dos pies de fábrica de ladrillo y de un pie en los muros de atado.

El forjado se discretizará mediante asimilación a losa maciza. Se utilizarán modificadores reductores de la rigidez a flexión transversal (M22) y de la rigidez del plano ante esfuerzos tangenciales (F12). De esta forma podemos simular el efecto diafragma más apropiado, tal como se expuso en el punto anterior.

Entre las lesiones más habituales, las que pueden modificar de manera importante los resultados de respuesta dinámicas son aquellas que desestructuran el edificio: grietas entre muros de carga y de atado, o desconexiones entre muro de atado y forjado.

De las posibles lesiones, se analizarán las situadas en primera crujía (ver Fig 4–34). En esta posición, y con las viguetas perpendiculares a fachada, el efecto rigidizador de la manzana es, evidentemente, menor que en la zona interior.

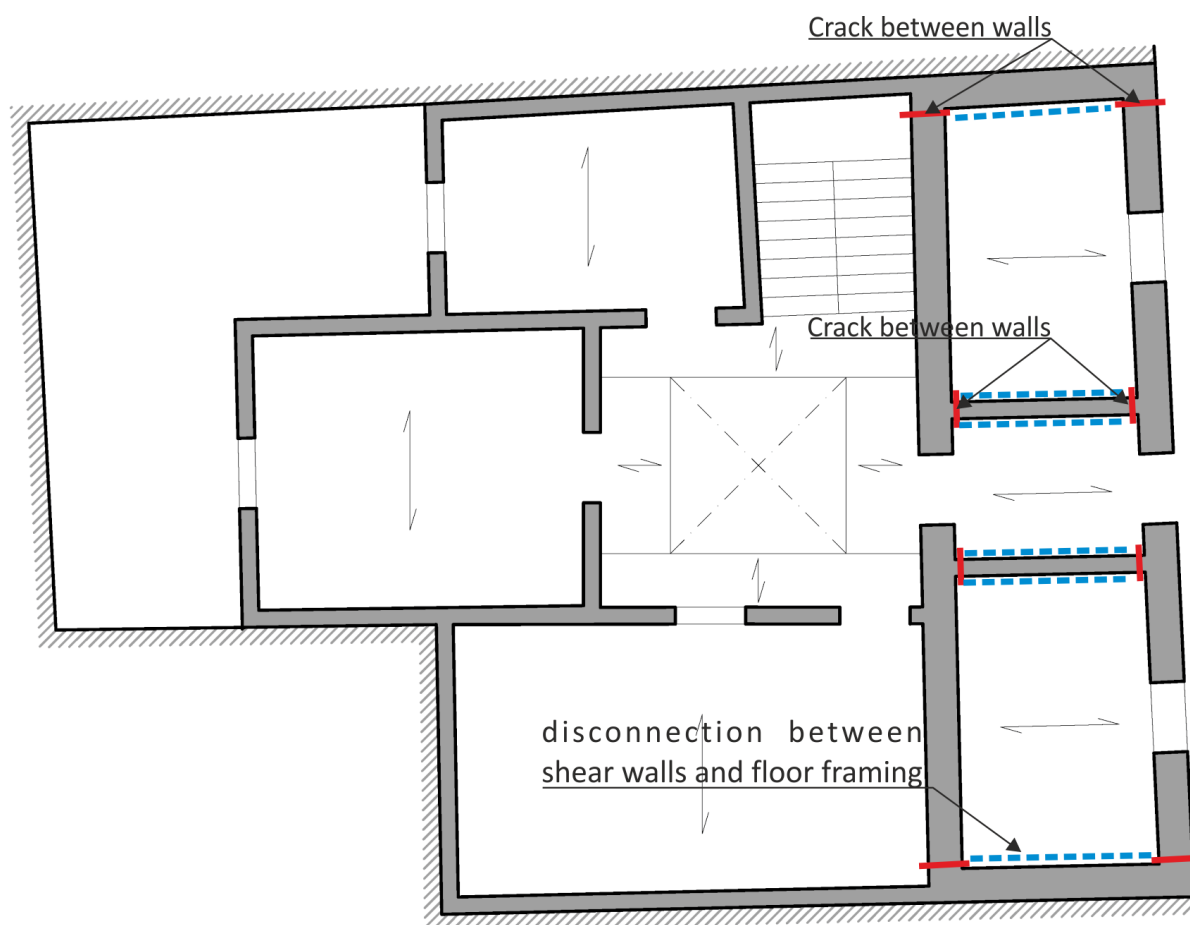


Fig 7–34: Esquema del edificio con indicación de las lesiones que se han introducido.

De las distintas casuísticas descritas anteriormente se han analizado 11 casos. La mitad de ellos, con el edificio aislado y la otra mitad con el edificio incluido dentro de la manzana. Se ha considerado el tipo de forjado, con o sin efecto diafragma, e introduciendo diversas lesiones. Describimos a continuación, en la Tabla 4–5, los casos estudiados:

Tabla 7–5: Descripción de los casos analizados

Caso	Descripción
M1	Edificio aislado. Forjado rígido. Sin lesiones.
M2	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado rígido. Sin lesiones.
M3	Edificio aislado. Forjado rígido. Lesiones entre muro de carga y de atado.
M4	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado rígido. Lesiones entre muro de carga y de atado.
M5	Edificio aislado. Forjado rígido. Lesiones entre muro de carga y de atado y entre forjado y muros de atado.
M6	Edificio aislado. Forjado flexible. Sin lesiones.
M7	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado flexible. Sin lesiones.
M8	Edificio aislado. Forjado flexible. Lesiones entre muro de carga y de atado.
M9	Edificio aislado. Forjado flexible. Lesiones entre muro de carga y de atado y entre forjado y muros de atado.
M10	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado flexible. Lesiones entre muro de carga y de atado.
M11	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado flexible. Lesiones entre muro de carga y de atado y entre forjado y muros de atado.

4.1.6 Influencia de las lesiones

La presencia de una lesión en una estructura altera sus propiedades dinámicas³⁴. Las primeras investigaciones en este campo, tal y como exponen Choi et al.³⁵, estuvieron centradas en la relación entre el daño y los cambios en las frecuencias naturales. Este método se ha aplicado con éxito mecánica y en estructuras simples, como vigas³⁶ o en estructuras simples, como torretas o plataformas petrolíferas³⁷.

34 Pandey, A. & Biswas, M. (1994). Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of Sound and Vibration*, 169, 3–17. doi:10.1006/jsvi.1994.1002, pag. 3 [22]

35 Choi, S., Park, S., & Stubbs, N. (2005). Nondestructive damage detection in structures using changes in compliance. *International Journal of Solids and Structures*, 42(15), 4494–4513. doi:10.1016/j.ijsolstr.2004.12.017, pag. 4495

36 Gudmundson, P. (1982). Eigenfrequency changes of structures due to cracks, notches or other geometrical changes. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 30(5), 339–353. doi:10.1016/0022-5096(82)90004-7

37 Vandiver, J. K. (1975). Structural evaluation of fixed offshore platforms. Woods Hole, MA: Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution. doi:10.1575/1912/1360

En muchos casos, la pérdida de un solo elemento de una estructura puede provocar cambios importantes. En estructuras isostáticas, incluso pueden hacer que el conjunto sea un mecanismo inestable³⁸; pero en estructuras muy hiperestáticas, como las estructuras laminares, es muy difícil detectar daños mediante cambios en las frecuencias naturales.

Este sistema basado en cambios en las frecuencias naturales, ha sido abandonado en estructuras complejas con múltiples grados de libertad, tachado de poco práctico, ya que aunque es posible detectar la presencia de una lesión basándose en los cambios en las frecuencias naturales, es difícil determinar la localización del daño.³⁹

También hay problemas en distinguir la existencia de una lesión en estructuras en las que pueden producirse cambios importantes en la masa total, ya que el cambio en la frecuencia podría deberse tanto a cambio en la rigidez como en la masa.

La mayor parte de las investigaciones han derivado a un análisis modal dinámico más completo, con un conjunto importante de puntos de ensayo, con el fin de contestar “todas” las siguientes cuestiones⁴⁰:

- 1) ¿Hay alguna lesión en el sistema (existencia)?
- 2) ¿Dónde está la lesión (localización)?
- 3) ¿Qué tipo de lesión (tipo)?
- 4) ¿Cómo de grave es el daño (extensión)?
- 5) ¿Cuánta vida útil le queda al sistema (prognosis)?

Las investigaciones siguientes han utilizado métodos cada vez más complejos para responder a todas estas cuestiones: búsqueda de cambios en las formas modales, en los Ritz vectors (o vectores de Lanczos), mediante actualización de matices, reconocimiento estadístico de patrones, mediante el teorema de Bayes, o con redes neurales artificiales (ANN).

Otras investigaciones han abordado el tema de la vulnerabilidad y los índices de daño.

No se va a profundizar en ninguno de estos métodos. Su nivel de complejidad y el número mínimo de puntos de ensayo necesarios hace que salgan fuera de la aplicación práctica de esta tesis.

Por otra parte, algunos investigadores han seguido proponiendo vías de aplicación del método de detección de cambios en las frecuencias naturales, mediante identificación numérica de las modificaciones que provocarían distintos fallos conocidos.

Muchas de estas investigaciones se han realizado en el ámbito de las plataformas *offshore*⁴¹:

38 Chang, P. C., Flatau, A., & Liu, S. C. (2003). Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Structural Health Monitoring*, 2(3), 257–267. doi:10.1177/1475921703036169, pag. 259

39 Pandey, A. & Biswas, M, op.cit. (1994), pag. 4

40 Kołakowski, P. (2007). Structural health monitoring—a review with the emphasis on low-frequency methods. *Engineering Transactions*, 55(3), 239–275. Retrieved from <http://etold.ippt.gov.pl/numbers/ET-2007-55-3.pdf#page=43>, pag. 239

41 Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). Damage identification and health monitor-

Vandiver⁴² (1975, 1977), Begg, et al.⁴³ (1976), Loland and Dodds⁴⁴ (1976), Wojnarowski, et al.⁴⁵ (1977), Coppolino and Rubin⁴⁶ (1980), Duggan, et al.⁴⁷ (1980), Kenley and Dodds⁴⁸ (1980), Crohas and Lepert⁴⁹ (1982), Nataraja⁵⁰ (1983), Whittome and Dodds⁵¹ (1983), Osegueda, et al.⁵² (1992)

Otras en ámbitos de edificación: Friswel et al.⁵³ (1994), Penny, et al.⁵⁴ (1993)

En general todos estos trabajos llegan a la conclusión de que es posible detectar daños cuando se tienen suficiente conocimiento acerca de la estructura y las lesiones son importantes.

Chang et al.⁵⁵ (2003) concluye que cuando el nivel de ruido es superior al 20-25% de la señal que produce la lesión, prácticamente todos los métodos son capaces de detectar el daño. Pero que en la realidad, las condiciones ambientales pueden introducir una señal superior a la de la lesión.

ing of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Los Alamos, New Mexico 87545. doi:10.2172/249299, pag. 6

- 42 Vandiver, J. K. (1975). Detection of Structural Failure on Fixed Platforms By Measurement of Dynamic Response. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/2267-MS
 - 43 Begg, R. ., Mackenzie, A. ., Dodds, C. ., & Loland, O. (1976). Structural integrity monitoring using digital processing of vibration signals. In 8th Annual Offshore Technology Conference (pp. 305–311). Houston, TX.
 - 44 Loland, O., & Dodds, C. J. (1976). Experiences in Developing Monitoring Systems and Operating Integrity In the North Sea. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/2551-MS
 - 45 Wojnarowski, M. E., Stiansen, S. G., & Reddy, N. E. (1977). Structural Integrity Evaluation Of A Fixed Platform Using Vibration Criteria. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/2909-MS
 - 46 Coppolino, R. N., & Rubin, S. N. (1980). Detectability Of Structural Failures In Offshore Platforms By Ambient Vibration Monitoring. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/3865-MS
 - 47 Duggan, D. M., Wallace, E. R., & Caldwell, S. R. (1980). Measured and Predicted Vibrational Behavior of Gulf of Mexico Platforms. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/3864-MS
 - 48 Kenley, R. M., & Dodds, C. J. (1980). West Sole WE Platform: Detection Of Damage By Structural Response Measurements. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/3866-MS
 - 49 Crohas, H., & Lepert, P. (1982). Damage-detection monitoring method for offshore platforms is field-tested. Oil Gas J.; (United States), 80:8(94), 99–100.
 - 50 Nataraja, R. (1983). Structural Integrity Monitoring in Real Seas. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/4538-MS
 - 51 Whittome, T. ., & Dodds, C. J. (1983). Monitoring Offshore Structures by Vibration Techniques. In Design in Offshore Structures Conference (pp. 93–100)
 - 52 Osegueda, R. ., DSouza, P. ., & Qiang, Y. . (1992). Damage Evaluation of Offshore Structures Using Resonant Frequency Shifts. In 1992 ASMEPVP Conference, ASME (pp. 31–37). New Orleans
 - 53 Friswell, M. I., Penny, J. E. ., & Wilson, D. A. . (1994). Using vibration data and statistical measures to locate damage in structures. Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 9(4), 239–254.
 - 54 Penny, J. E. ., Wilson, D. A. ., & Friswell, M. I. (1993). Damage Location in Structures Using Vibration Data. In 1993 IMAC XI - 11th International Modal Analysis Conference (pp. 861–867). Kissimmee, Florida, USA
 - 55 Chang, P. C., Flatau, A., & Liu, S. C., op. cit. (2003), pag. 264
-

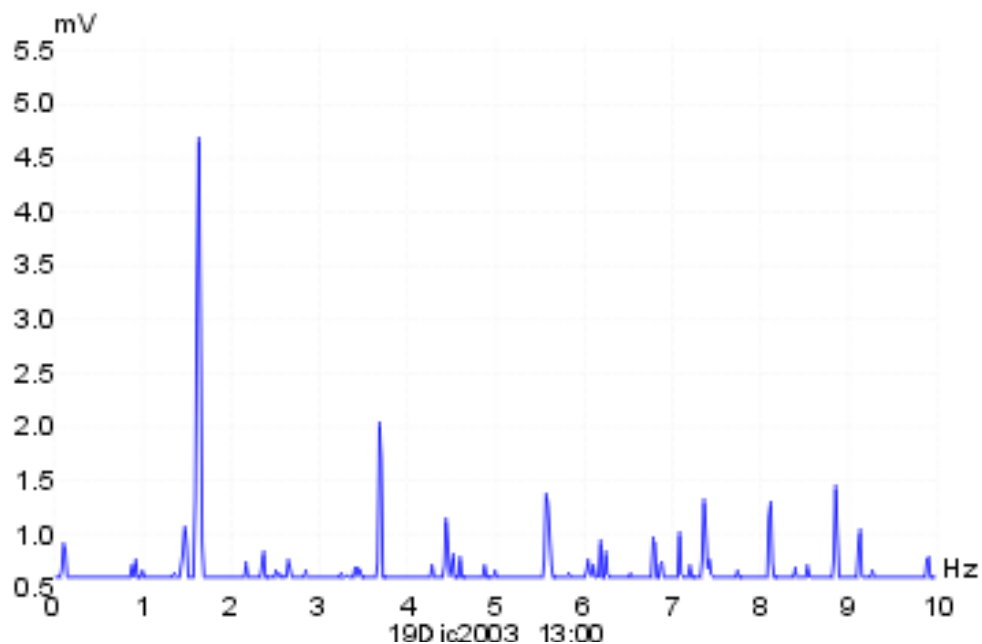


Fig 7–35: Medición realizada en edificio en C/ Reyes Católicos

En el caso que nos ocupa la experiencia ha demostrado que la respuesta de este tipo de estructuras, cuando existen desconexiones entre muros de carga y de atado, presenta picos suficientemente importantes como para distinguirse de la señal del ruido ambiente (ver Fig 4–35).

Para comprobar la influencia de las lesiones en la respuesta de la estructura, se introducirán lesiones en los modelos. En la Fig 4–36 se representan las desconexiones entre muros que se han supuesto. Además se ha marcado la desconexión entre forjados y muros de atado.

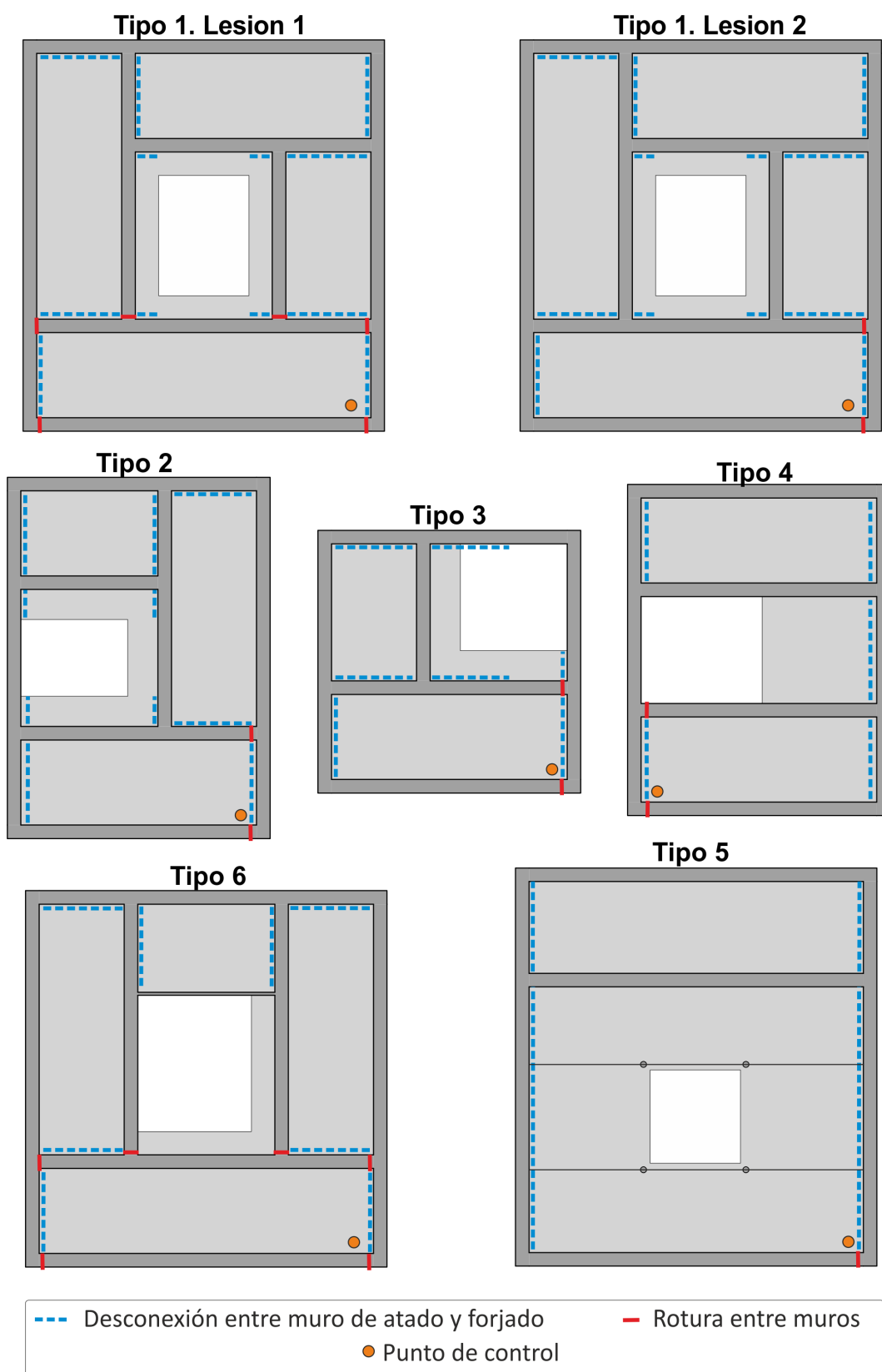


Fig 7-36: Esquema de lesiones analizadas.

4.2 Análisis dinámico por elementos finitos

El objetivo del presente capítulo es presentar las técnicas empleadas en los modelos de elementos finitos que se han realizado en el estudio. Dichos modelos no reflejan fielmente todas las características de las estructuras reales, pero sí las más importantes para el análisis dinámico. Su facilidad de implementación, frente a la complejidad que implica analizar experimentalmente un número importante de estructuras reales, hace que esta herramienta sea la idónea para un primer acercamiento y para obtener las primeras conclusiones.

Mediante los modelos de elementos finitos se intentará identificar las frecuencias de la estructura y mediante el análisis de los cambios de dichas frecuencias para las variaciones de cada parámetro se intentará buscar la sensibilidad de la estructura ante las modificaciones de los parámetros de estudio.

El programa con el que se va a realizar el cálculo numérico, Sap2000 v16, incluye varios métodos de cálculo de las frecuencias naturales de vibración. Entre ellos, son especialmente interesantes los métodos Steady State y PSD, por el buen nivel gráfico de la salida de resultados. Esto va a permitir identificar rápidamente los cambios más importantes.

Ambos métodos realizan el análisis de la respuesta de la estructura para una carga cíclica (sinusoidal, armónica...) en el dominio de la frecuencia. La diferencia principal radica en que: en el caso del método Steady State la carga debe ser conocida, por lo que suele emplearse en análisis determinístico (tipo EMA), mientras que en el método PSD la carga es variable y se aplica un criterio probabilístico. Por ello, en este caso utilizaremos el método PSD.

El proceso de análisis Steady State, con ejemplos de aplicación en Sap2000⁵⁶ puede ser consultado en el manual del programa, en Barret⁵⁷ (2006) y en Perry⁵⁸ (2003).

4.2.1 El método PSD

La densidad espectral de potencia (PSD) de una señal, es un método de escalado de la amplitud de un espectro, que a veces se confunde con el espectro de esa señal, ya que ambas funciones permiten identificar periodicidades en la señal.

56 Computers and Structures Inc. (2011). CSI Analysis Reference Manual. Berkeley, California.

57 Barrett, A. R. (2006, October 6). Dynamic Testing of In-Situ Composite Floors and Evaluation of Vibration Serviceability Using the Finite Element Method (unpublished PhD. thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University. Retrieved from <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-09062006-184827/>

58 Perry, J. D. (2003, December 17). A Study of Computer Modeling Techniques to Predict the Response of Floor Systems Due to Walking. Virginia Polytechnic Institute and State University. Retrieved from <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-12142003-174939/> [41]Floor Vibrations Due to Human Activity (Murray, et al., 1997

Matemáticamente, la función PSD de una señal se define como la transformada de Fourier (FT) de la función de autocorrelación (ACF) de dicha señal⁵⁹. Es una función real, positiva, de una variable, que muestra cómo se distribuye la potencia de una señal a lo largo de las distintas frecuencias que la componen. Por tanto su representación habitual es una gráfica de tipo periodograma, donde las frecuencias se representan en el eje de abscisas, mientras que en el de ordenadas se suele representar la amplitud al cuadrado partido por la frecuencia (V^2/Hz , $db^2/Hz...$). En el caso del cálculo estructural la unidad suele ser $aceleracion^2/Hz$ [$(m/seg^2)^2/Hz$], por lo que en algunas referencias pueden referirse a esta función como ASD (acceleration spectral density).

Un caso de carga PSD calcula la respuesta de la estructura para una carga cíclica (sinusoidal, armónica) en un rango de frecuencias, y luego integra el espectro resultante ponderando por una función probabilística de densidad espectral potencia para obtener una media cuadrática (RMS) de la respuesta esperada.

4.2.2 Parámetros empleados en los modelos.

En cada modelo el cálculo PSD se efectuará en un punto situado en la cubierta del edificio, cerca del extremo norte de la fachada, en dos direcciones ortogonales, perpendicular a fachada y paralela a fachada.

Se ha considerado que la excitación provocada por el ruido ambiente es parecida a un ruido blanco^{60 61}. Para los modelo de Sap2000, se ha definido la función probabilística de valor constante igual a 1 para todo el rango de frecuencias.

Se han definido dos cargas unitarias aplicadas en el punto de control. En dirección X se ha definido en fase con la función armónica, mientras que en la dirección Y se ha supuesto en contrafase. Dichas cargas serán ponderadas mediante la función probabilística y por un factor de escala "1".

Se ha considerado un amortiguamiento histerético constante para todas las frecuencias.

La función puede calcularse para una señal continua o discreta. En nuestro caso, se ha calculado la frecuencia de respuesta para un rango de frecuencias entre 0 y 100 Hz y se han realizado es-

59 Chatzi, E. (2012). Identification Methods for Structural Systems. Retrieved from http://www.ibk.ethz.ch/ch/education/identmeth/lecture8_2012.pdf

60 Peeters, B., Vanhollenbeke, F., & Van Der Auweraer, H. (2005). Operational PolyMAX for estimating the dynamic properties of a stadium structure during a football game. IMAC-XXIII: Conference & Exposition on Structural Dynamics - Structural Health Monitoring, (1). Retrieved from <http://sem-proceedings.com/23i/sem.org-IMAC-XXIII-Conf-s06p01-Operational-PolyMAX-Estimating-Dynamic-Properties-Stadium-Structure.pdf>

61 Cunha, Á., & Caetano, E. (2006). Experimental modal analysis of civil engineering structures. Sound and Vibration, (June), 12–20. doi:10.1007/978-1-4020-6239-1_299, pag. 15

calones de 0,25 Hz. Además, el programa permite incluir las frecuencias del análisis modal. Por lo que se ha realizado previamente un análisis modal en el que han detectado los 200 primeros modos y se han utilizado las frecuencias asociadas a dichos modos. De esta forma se evita el error que puede implicar la precisión de 0,25 Hz.

5. Descripción de los modelos.

5.1 Parametrización y construcción de los modelos

Debido al elevado número de casos de estudio, para la construcción de los modelos de elementos finitos se han utilizado técnicas de modelado paramétrico. Para ello se ha contado con la ayuda del programa CAD Rhinoceros¹ y el *plugin* de modelado algorítmico Grasshopper².

La versatilidad de dicho *plugin* en combinación con lenguajes de programación tradicionales como VisualBasic o Python ha permitido, una vez realizado los seis modelos paramétricos, generar fácilmente desde el programa CAD los archivos de Sap2000.

El proceso ha comenzado por la parametrización de los seis tipos arquitectónicos que se expusieron en el punto 4.1.1 (ver Fig 5–1 a Fig 5–6).

TIPO 1

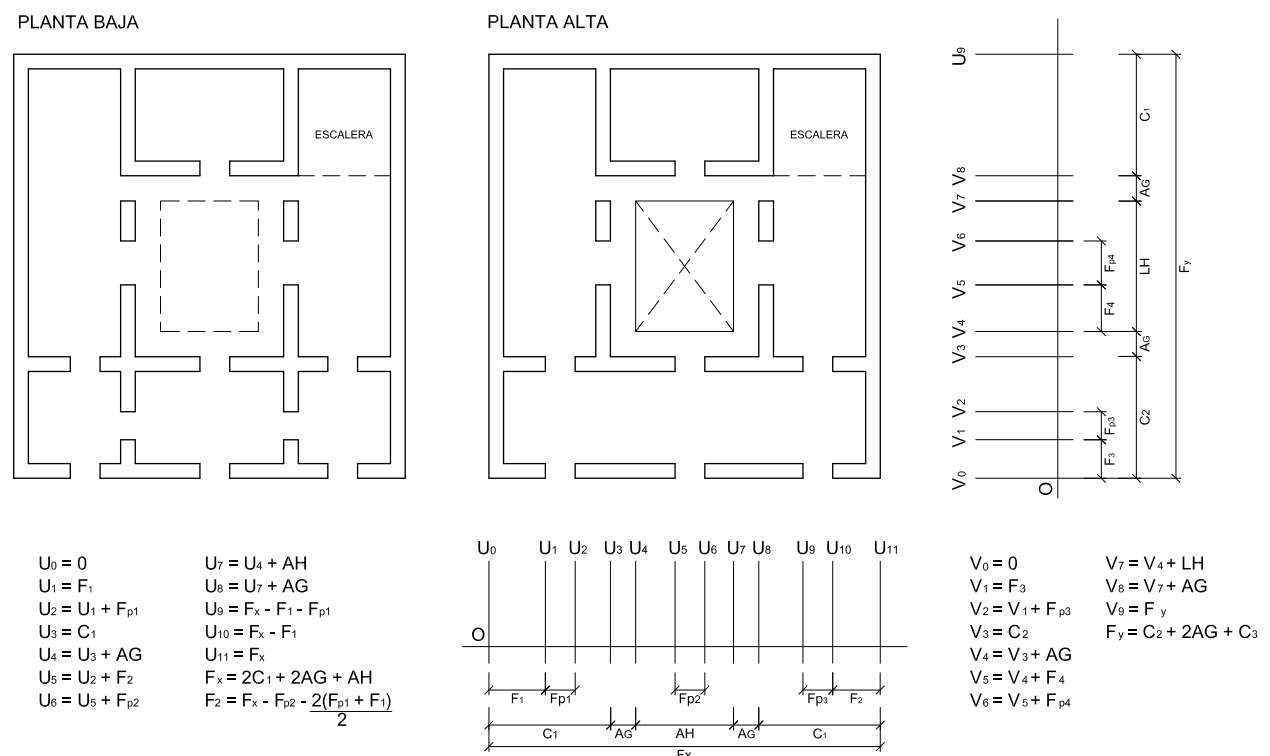


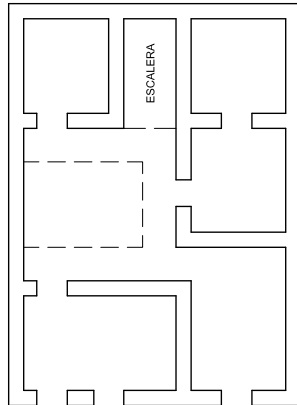
Fig 9–1: Esquema de edificio tipo 1

1 <http://www.rhino3d.com> (Robert McNeel & Associates)

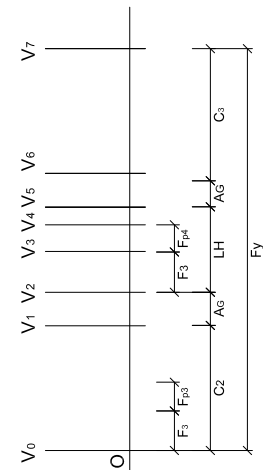
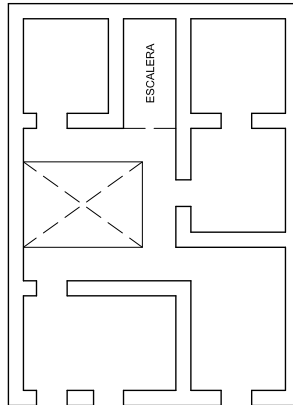
2 <http://www.grasshopper3d.com>

TIPO 2

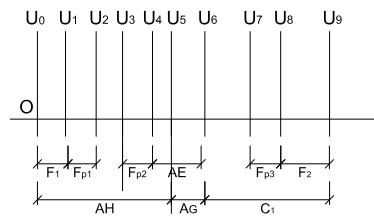
PLANTA BAJA



PLANTA ALTA



$$\begin{aligned}
 U_0 &= 0 \\
 U_1 &= F_1 \\
 U_2 &= U_1 + F_{p1} \\
 U_3 &= F_x - C_1 - AE - F_{p2} \\
 U_4 &= U_3 + F_{p2} \\
 U_5 &= AH \\
 U_6 &= U_5 + AG \\
 U_7 &= F_x - F_2 - F_{p3} \\
 U_8 &= F_x - F_2 \\
 U_9 &= F_x
 \end{aligned}$$

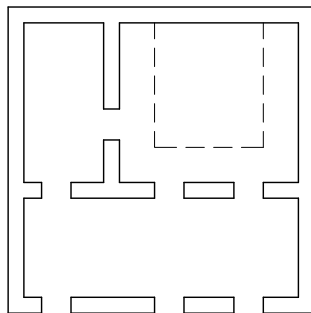


$$\begin{aligned}
 V_0 &= 0 \\
 V_1 &= C_2 \\
 V_2 &= V_1 + AG \\
 V_3 &= V_2 + F_3 \\
 V_4 &= V_3 + F_{p4} \\
 V_5 &= V_2 + LH \\
 V_6 &= V_5 + AG \\
 V_7 &= F_y \\
 F_y &= C_2 + 2AG + LH + C_3
 \end{aligned}$$

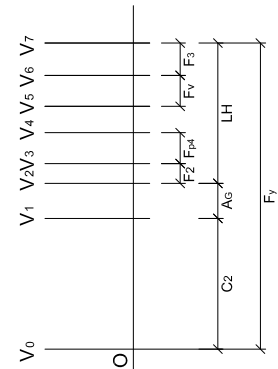
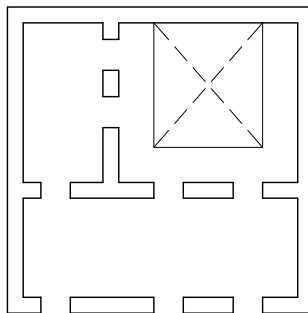
Fig 9-2: Esquema de edificio tipo 2

TIPO 3

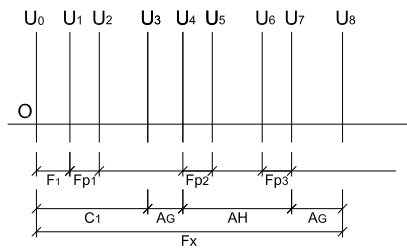
PLANTA BAJA



PLANTA ALTA



$$\begin{aligned}
 U_0 &= 0 \\
 U_1 &= F_1 \\
 U_2 &= U_1 + F_{p1} \\
 U_3 &= C_1 \\
 U_4 &= U_3 + AG \\
 U_5 &= U_4 + F_{p2} \\
 U_6 &= U_5 + F_f \\
 U_7 &= U_4 + AH \\
 U_8 &= F_x \\
 F_x &= C_1 + 2AG + AH
 \end{aligned}$$

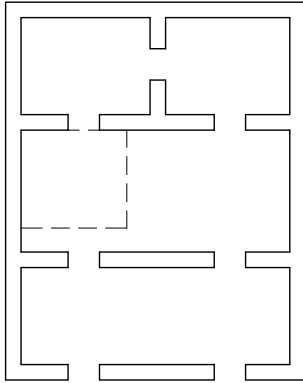


$$\begin{aligned}
 V_0 &= 0 \\
 V_1 &= C_2 \\
 V_2 &= V_1 + AG \\
 V_3 &= V_2 + F_2 \\
 V_4 &= V_3 + F_{p4} \\
 V_5 &= V_4 + F_1 \\
 V_6 &= V_5 + F_v \\
 V_7 &= F_y \\
 F_y &= C_2 + AG + LH
 \end{aligned}$$

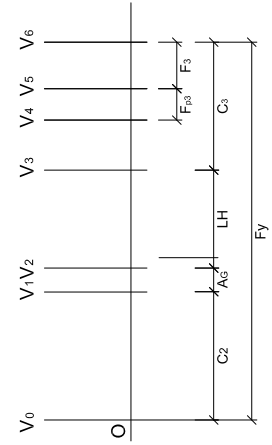
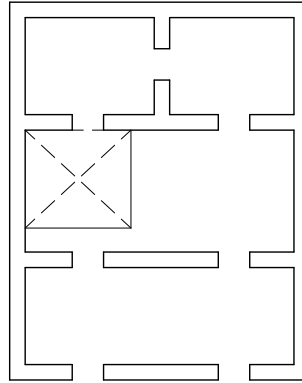
Fig 9-3: Esquema de edificio tipo 3

TIPO 4

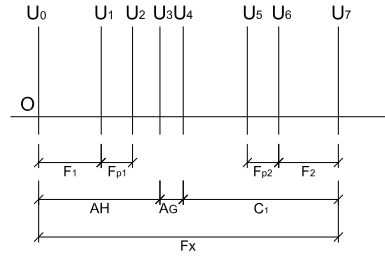
PLANTA BAJA



PLANTA ALTA



$$\begin{aligned} U_0 &= 0 \\ U_1 &= F_1 \\ U_2 &= U_1 + F_{p1} \\ U_3 &= AH \\ U_4 &= U_3 + AG \\ U_5 &= F_x - F_2 - F_{p2} \\ U_6 &= F_x - F_2 \\ U_7 &= F_x \\ F_x &= AH + AG + C_1 \end{aligned}$$

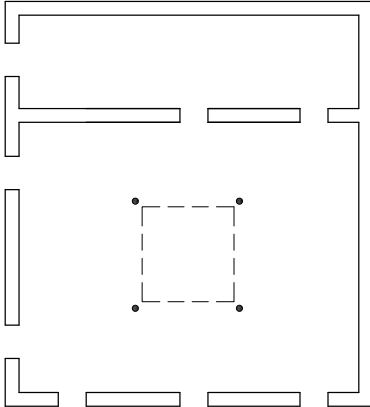


$$\begin{aligned} V_0 &= 0 \\ V_1 &= C_2 \\ V_2 &= V_1 + AG \\ V_3 &= V_2 + LH \\ V_4 &= F_y - F_3 - F_{p3} \\ V_5 &= F_y - F_3 \\ V_6 &= F_y \\ F_y &= C_2 + AG + LH + C_3 \end{aligned}$$

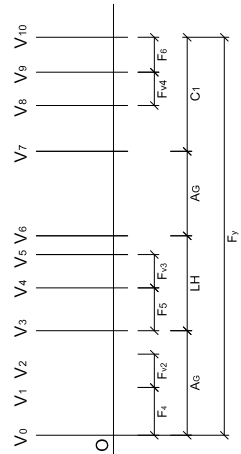
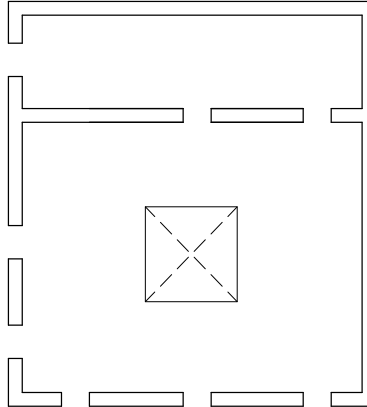
Fig 9-4: Esquema de edificio tipo 4

TIPO 5

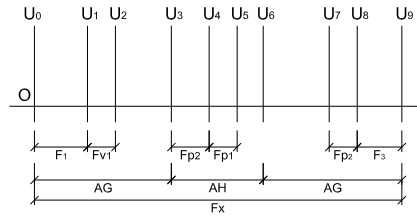
PLANTA BAJA



PLANTA ALTA



$$\begin{aligned} U_0 &= 0 \\ U_1 &= F_1 \\ U_2 &= U_1 + F_{v1} \\ U_3 &= AG \\ U_4 &= U_3 + F_2 \\ U_5 &= U_4 + F_{p1} \\ U_6 &= U_3 + AH \\ U_7 &= F_x - F_3 - F_{p2} \\ U_8 &= F_x - F_2 \\ U_9 &= F_x \\ F_x &= 2AG + AH \end{aligned}$$

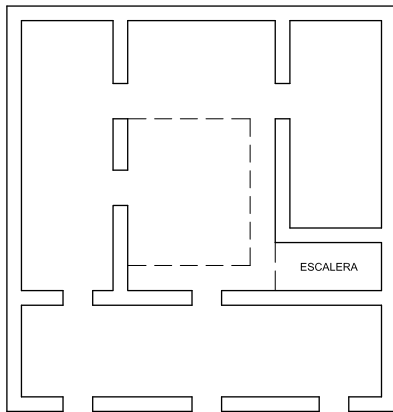


$$\begin{aligned} V_0 &= 0 \\ V_1 &= F_4 \\ V_2 &= V_1 + F_{v2} \\ V_3 &= AG \\ V_4 &= V_3 + F_5 \\ V_5 &= V_4 + F_{v3} \\ V_6 &= V_3 + LH \\ V_7 &= V_6 + AG \\ V_8 &= F_x - F_6 - F_{v4} \\ V_9 &= F_x - F_6 \\ V_{10} &= F_y \\ F_y &= 2AG + LH + C_1 \end{aligned}$$

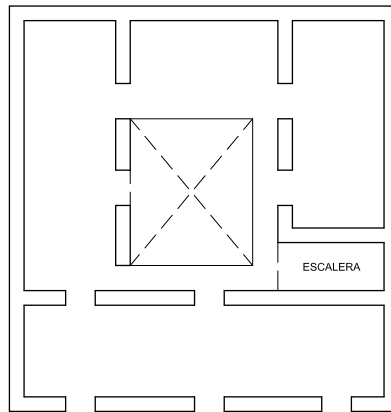
Fig 9-5: Esquema de edificio tipo 5

TIPO 6

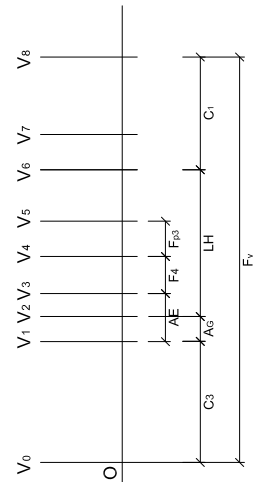
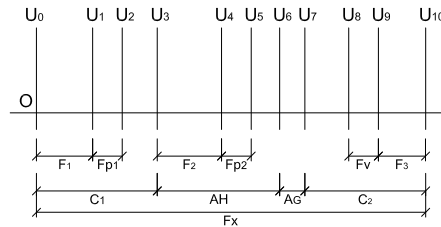
PLANTA BAJA



PLANTA ALTA



$$\begin{aligned}
 U_0 &= 0 \\
 U_1 &= F_1 \\
 U_2 &= U_1 + F_{p1} \\
 U_3 &= C_1 \\
 U_4 &= U_3 + F_2 \\
 U_5 &= U_4 + F_{p2} \\
 U_6 &= C_1 + AH \\
 U_7 &= U_6 + AG \\
 U_8 &= F_x - F_3 - F_v \\
 U_9 &= F_x - F_3 \\
 U_{10} &= F_x \\
 F_x &= C_1 + AH + AG + C_2
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 V_0 &= 0 \\
 V_1 &= C_3 \\
 V_2 &= V_1 + AG \\
 V_3 &= V_1 + AE \\
 V_4 &= V_3 + F_4 \\
 V_5 &= V_4 + F_{p3} \\
 V_6 &= V_2 + LH \\
 V_7 &= V_6 + F_{p4} \\
 V_8 &= F_y \\
 F_y &= C_3 + AG + C_4
 \end{aligned}$$

Fig 9-6: Esquema de edificio tipo 6

Estos esquemas se han modelado en Grasshoper mediante el siguiente código (Fig 5-7):

En el esquema general, podemos encontrar:

- el cluster 1, que se encarga de generar el modelo 3D del edificio tipo 1
- el cluster 2 que genera la definición de nudos y elementos shell en Sap2000
- el nodo 3 es una rutina en código Python que genera la asignación de cargas (detallada en el Anejo A.1.8)
- el nodo 4 es una rutina en código Python que especifica la ruta de salida del archivo (detallada en el Anejo A.1.13)
- el nodo 5 es una rutina en código Python que genera la cabecera del archivo de Sap2000 (detallada en el Anejo A.1.14)
- el nodo 6 es una rutina en código Python que empaqueta los archivos generados en uno solo (detallada en el Anejo A.1.10)
- el nodo 7 es una rutina en código Python que borra los archivos temporales (detallada en el Anejo A.1.15)
- el nodo 8 es una rutina en código Python que genera la definición de material (detallada en el Anejo A.1.16)
- el nodo 9 es una rutina en código Python que genera la definición de secciones tipo shell (detallada en el Anejo A.1.17)
- el nodo 10 es una rutina en código Python que genera la definición de "Loads Paterns" (detallada en el Anejo A.1.18)
- el nodo 11 es una rutina en código Python que genera la definición "Loads Cases (deta-

Nombre y ruta del archivo
Activadores de procesos

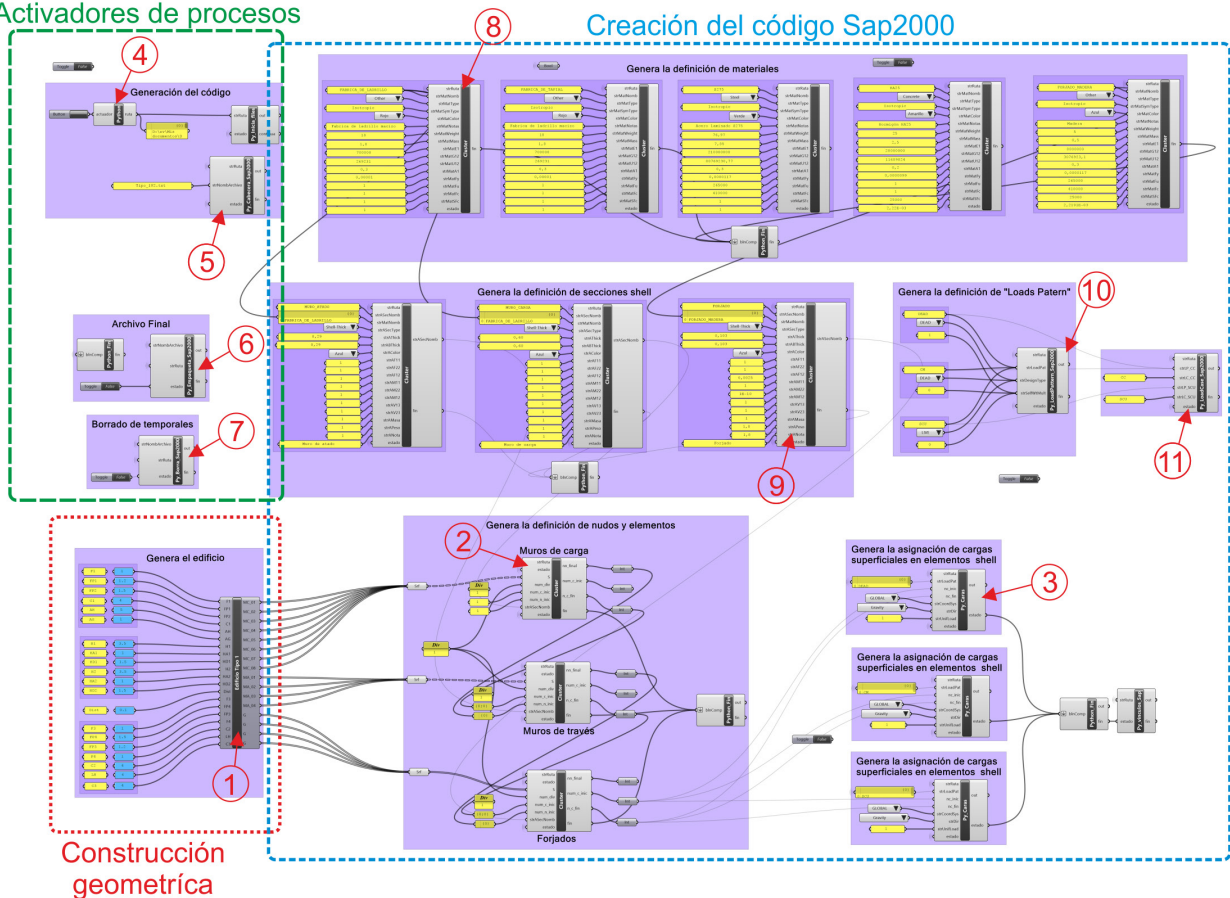


Fig 9-7: Detalle del código general.

llada en el Anejo A.1.19)

El apartado de Construcción geométrica es diferente para cada uno de los tipos.

A continuación, en la Fig 5-8 se describe el nodo de construcción geométrica correspondiente al Tipo 1, que está empaquetado en un cluster numerado como 1 en la Fig 5-7. En él se incluyen tres nodos con código Python, numerados 17 a 19 y detallados en los anejos A.1.1 a A.1.3 respectivamente.

El cluster 2, que se detalla en la Fig 5-9, está compuesto por tres definiciones, en la primera (numerada como 12), se realiza el mallado del modelo y se generan los nudos y las caras. La segunda definición, numerada como 13 y descrita en el anejo A.1.6, es una rutina en código Python que genera el listado de nudos para Sap2000. En la tercera, numerada como 14 y descrita en el anejo A.1.7, es una rutina en código Python que genera el listado de caras y la asignación de propiedades.

El cluster 12 (detallado en Fig 5-10) contiene una rutina en código Python que genera la lista total de nodos eliminando repeticiones (numerada como 15 y expuesta en el anejo A.1.4), y una rutina escrita igualmente en código Python (numerada como 16 y expuesta en el anejo A.1.11), que consulta para cada shell, las coordenadas del nodo y busca esas coordenadas en la lista global



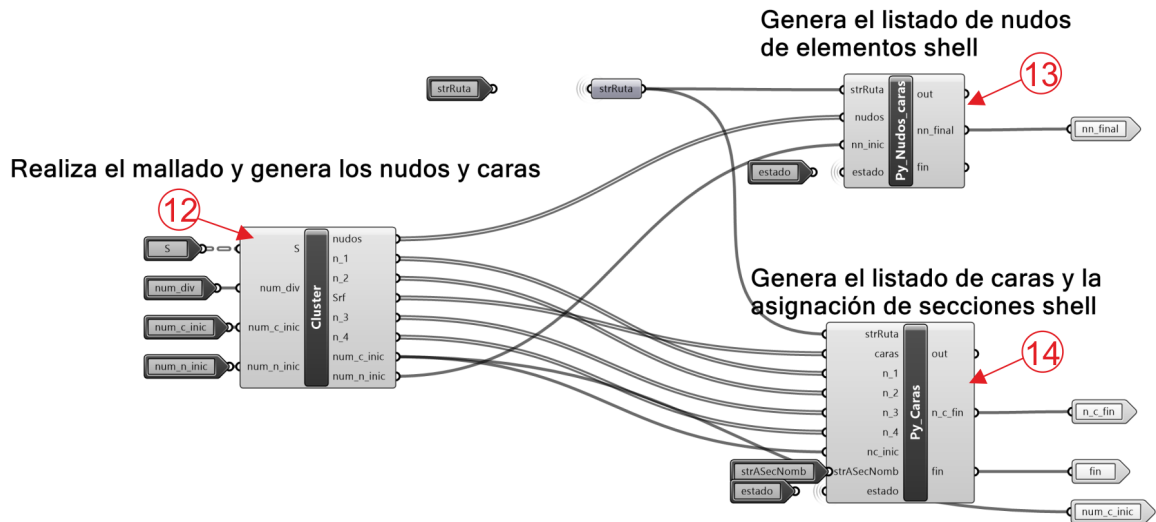


Fig 9-9: Detalle del cluster 2, que genera la definición de nodos y elementos shell en Sap2000.

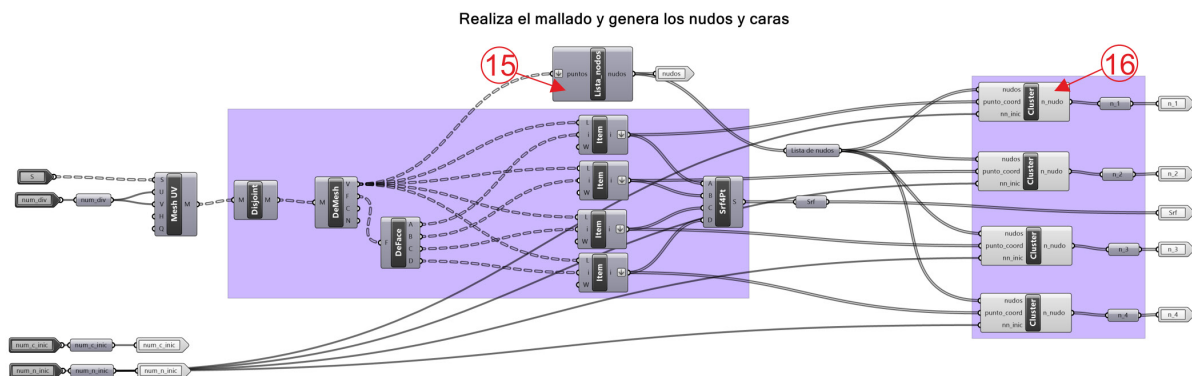


Fig 9-10: Detalle del cluster 12, que realiza el mallado y genera los nudos y caras del modelo.

generada en 6.

5.2 Parámetros empleados

Para la construcción de los modelos se han modificado las dimensiones de algunos parámetros, obteniendo tres variantes de cada tipo geométrico:

V1		Variantes		
		V2	V3	
Tipo 1	C1	3,0	3,5	4,0
	C2	3,0	3,5	4,0
	C3	3,0	3,5	4,0
	LH	4,0	5,0	6,0
	AH	3,0	4,0	5,0
Tipo 2	C1	3,0	3,5	4,0
	C2	3,0	3,5	4,0
	C3	3,0	3,5	4,0
	LH	4,0	5,0	6,0
	AH	5,0	6,0	7,0
Tipo 3	C1	3,0	3,5	4,0
	C2	3,0	3,5	4,0
	AH	4,0	5,0	6,0
	LH	5,0	6,0	7,0
Tipo 4	C1	3,0	3,5	4,0
	C2	3,0	3,5	4,0
	C3	3,0	3,5	4,0
	AH	4,0	5,0	6,0
	LH	2,0	3,0	4,0
Tipo 5	C1	3,0	3,5	4,0
	AG	3,0	3,5	4,0
	AH	3,0	3,5	4,0
	LH	3,0	3,5	4,0
Tipo 6	C1	3,0	3,5	4,0
	C2	3,0	3,5	4,0
	C3	3,0	3,5	4,0
	C4	3,5	4,0	5,0

Cada una de las variantes se ha calculado con nueve tipos distintos de forjado:

- F1: Viguetas de madera y tablazón de madera
- F2: Viguetas de madera y tablero de doble rasilla

- F3: Viguetas de madera y revoltón cerámico
- F4: Rollizo y tablazón de madera
- F5: Rollizo y tablero de doble rasilla
- F6: Viguetas de acero y revoltón cerámico
- F7: Viguetas de acero y bovedilla
- F8: Viguetas de hormigón y revoltón cerámico
- F9: Viguetas de hormigón y bovedilla

En el modelo de elementos finitos, los muros y los forjados se han discretizado con elementos tipo *shell*.

Para los muros se han asignado espesores de 60 cm a los muros de carga y 30 cm a los de través. Como módulo de elasticidad para los cálculos generales se ha utilizado el de una fábrica blanda (700 N/mm^2). Además se han realizado cálculo de algunos modelos con un módulo de elasticidad más alto, correspondiente a una fábrica más dura (1.500 N/mm^2), pero siempre pensando en que no se trata de una fábrica nueva.

En el caso de los forjados, se ha asignado el material de la viga como material base del elemento *shell*. Se ha calculado un espesor equivalente para que tenga la misma inercia que la sección transversal del forjado y se han utilizado modificadores para el peso, la rigidez F12 (minoración del efecto diafragma) y la rigidez M22 (efecto unidireccional).

Forj	Descripción	Peso Esp	Canto eq	Mod. Peso	Mod. M22	Mod. F12
		kN/m ²	cm			
1	Viguetas de madera y tablazón de madera	5,0	10,30	1,80	1,00E-10	0,0025
2	Viguetas madera y tablero de doble rasilla	5,0	12,68	3,55	1,00E-10	0,0025
3	Viguetas de madera y revoltón cerámico	5,0	11,41	4,21	1,00E-10	0,01
4	Rollizo y tablazón de madera	5,0	5,28	5,68	1,00E-10	0,0025
5	Rollizo y tablero de doble rasilla	5,0	5,28	9,46	1,00E-10	0,0025
6	Viguetas de acero y revoltón cerámico	78,5	3,83	0,90	1,00E-10	0,01
7	Viguetas de acero y bovedilla sin capa compresión	78,5	4,03	0,76	1,00E-10	0,01
8	Viguetas de hormigón y revoltón cerámico	25,0	5,10	2,51	1,00E-10	0,01
9	Viguetas de hormigón y bovedilla sin capa compresión	25,0	4,85	1,90	1,00E-10	0,01

Los datos empleados en los materiales son:

Madera:

- Peso específico: 5,00 kN/m²
- Modulo de elasticidad: 8.000 N/mm²

Acero:

- Peso específico: 78,50 kN/m²
- Modulo de elasticidad: 210.000 N/mm²

Hormigón:

- Peso específico: 25,00 kN/m²
- Modulo de elasticidad: 28.000 N/mm²

Fábrica blanda (E1):

- Peso específico: 18,00 kN/m²
- Modulo de elasticidad: 700 N/mm²

Fábrica dura (E2):

- Peso específico: 18,00 kN/m²
- Modulo de elasticidad: 1500 N/mm²

Se han combinado los seis tipos arquitectónicos con sus tres variantes, con nueve tipos de forjado por variante y se han analizado 154 casos con el módulo de elasticidad de la fábrica blanda y sin lesiones.

Además se han analizado los mismos casos pero con la suposición de que existen lesiones.

El listado completo de casos es el siguiente:

Sin lesion		Lesionado		Sin lesion		Lesionado	
Caso	Nombre	Caso	Nombre	Caso	Nombre	Caso	Nombre
1	T1V1F1E1SL	163	T1V1F1E1L	82	T4V1F1E1SL	244	T4V1F1E1L
2	T1V1F2E1SL	164	T1V1F2E1L	83	T4V1F2E1SL	245	T4V1F2E1L

Sin lesión		Lesionado		Sin lesión		Lesionado	
Caso	Nombre	Caso	Nombre	Caso	Nombre	Caso	Nombre
3	T1V1F3E1SL	165	T1V1F3E1L	84	T4V1F3E1SL	246	T4V1F3E1L
4	T1V1F4E1SL	166	T1V1F4E1L	85	T4V1F4E1SL	247	T4V1F4E1L
5	T1V1F5E1SL	167	T1V1F5E1L	86	T4V1F5E1SL	248	T4V1F5E1L
6	T1V1F6E1SL	168	T1V1F6E1L	87	T4V1F6E1SL	249	T4V1F6E1L
7	T1V1F7E1SL	169	T1V1F7E1L	88	T4V1F7E1SL	250	T4V1F7E1L
8	T1V1F8E1SL	170	T1V1F8E1L	89	T4V1F8E1SL	251	T4V1F8E1L
9	T1V1F9E1SL	171	T1V1F9E1L	90	T4V1F9E1SL	252	T4V1F9E1L
10	T1V2F1E1SL	172	T1V2F1E1L	91	T4V2F1E1SL	253	T4V2F1E1L
11	T1V2F2E1SL	173	T1V2F2E1L	92	T4V2F2E1SL	254	T4V2F2E1L
12	T1V2F3E1SL	174	T1V2F3E1L	93	T4V2F3E1SL	255	T4V2F3E1L
13	T1V2F4E1SL	175	T1V2F4E1L	94	T4V2F4E1SL	256	T4V2F4E1L
14	T1V2F5E1SL	176	T1V2F5E1L	95	T4V2F5E1SL	257	T4V2F5E1L
15	T1V2F6E1SL	177	T1V2F6E1L	96	T4V2F6E1SL	258	T4V2F6E1L
16	T1V2F7E1SL	178	T1V2F7E1L	97	T4V2F7E1SL	259	T4V2F7E1L
17	T1V2F8E1SL	179	T1V2F8E1L	98	T4V2F8E1SL	260	T4V2F8E1L
18	T1V2F9E1SL	180	T1V2F9E1L	99	T4V2F9E1SL	261	T4V2F9E1L
19	T1V3F1E1SL	181	T1V3F1E1L	100	T4V3F1E1SL	262	T4V3F1E1L
20	T1V3F2E1SL	182	T1V3F2E1L	101	T4V3F2E1SL	263	T4V3F2E1L
21	T1V3F3E1SL	183	T1V3F3E1L	102	T4V3F3E1SL	264	T4V3F3E1L
22	T1V3F4E1SL	184	T1V3F4E1L	103	T4V3F4E1SL	265	T4V3F4E1L
23	T1V3F5E1SL	185	T1V3F5E1L	104	T4V3F5E1SL	266	T4V3F5E1L
24	T1V3F6E1SL	186	T1V3F6E1L	105	T4V3F6E1SL	267	T4V3F6E1L
25	T1V3F7E1SL	187	T1V3F7E1L	106	T4V3F7E1SL	268	T4V3F7E1L
26	T1V3F8E1SL	188	T1V3F8E1L	107	T4V3F8E1SL	269	T4V3F8E1L
27	T1V3F9E1SL	189	T1V3F9E1L	108	T4V3F9E1SL	270	T4V3F9E1L
28	T2V1F1E1SL	190	T2V1F1E1L	109	T5V1F1E1SL	271	T5V1F1E1L
29	T2V1F2E1SL	191	T2V1F2E1L	110	T5V1F2E1SL	272	T5V1F2E1L
30	T2V1F3E1SL	192	T2V1F3E1L	111	T5V1F3E1SL	273	T5V1F3E1L
31	T2V1F4E1SL	193	T2V1F4E1L	112	T5V1F4E1SL	274	T5V1F4E1L
32	T2V1F5E1SL	194	T2V1F5E1L	113	T5V1F5E1SL	275	T5V1F5E1L
33	T2V1F6E1SL	195	T2V1F6E1L	114	T5V1F6E1SL	276	T5V1F6E1L
34	T2V1F7E1SL	196	T2V1F7E1L	115	T5V1F7E1SL	277	T5V1F7E1L
35	T2V1F8E1SL	197	T2V1F8E1L	116	T5V1F8E1SL	278	T5V1F8E1L
36	T2V1F9E1SL	198	T2V1F9E1L	117	T5V1F9E1SL	279	T5V1F9E1L
37	T2V2F1E1SL	199	T2V2F1E1L	118	T5V2F1E1SL	280	T5V2F1E1L
38	T2V2F2E1SL	200	T2V2F2E1L	119	T5V2F2E1SL	281	T5V2F2E1L
39	T2V2F3E1SL	201	T2V2F3E1L	120	T5V2F3E1SL	282	T5V2F3E1L
40	T2V2F4E1SL	202	T2V2F4E1L	121	T5V2F4E1SL	283	T5V2F4E1L

Sin lesion		Lesionado	
Caso	Nombre	Caso	Nombre
41	T2V2F5E1SL	203	T2V2F5E1L
42	T2V2F6E1SL	204	T2V2F6E1L
43	T2V2F7E1SL	205	T2V2F7E1L
44	T2V2F8E1SL	206	T2V2F8E1L
45	T2V2F9E1SL	207	T2V2F9E1L
46	T2V3F1E1SL	208	T2V3F1E1L
47	T2V3F2E1SL	209	T2V3F2E1L
48	T2V3F3E1SL	210	T2V3F3E1L
49	T2V3F4E1SL	211	T2V3F4E1L
50	T2V3F5E1SL	212	T2V3F5E1L
51	T2V3F6E1SL	213	T2V3F6E1L
52	T2V3F7E1SL	214	T2V3F7E1L
53	T2V3F8E1SL	215	T2V3F8E1L
54	T2V3F9E1SL	216	T2V3F9E1L
55	T3V1F1E1SL	217	T3V1F1E1L
56	T3V1F2E1SL	218	T3V1F2E1L
57	T3V1F3E1SL	219	T3V1F3E1L
58	T3V1F4E1SL	220	T3V1F4E1L
59	T3V1F5E1SL	221	T3V1F5E1L
60	T3V1F6E1SL	222	T3V1F6E1L
61	T3V1F7E1SL	223	T3V1F7E1L
62	T3V1F8E1SL	224	T3V1F8E1L
63	T3V1F9E1SL	225	T3V1F9E1L
64	T3V2F1E1SL	226	T3V2F1E1L
65	T3V2F2E1SL	227	T3V2F2E1L
66	T3V2F3E1SL	228	T3V2F3E1L
67	T3V2F4E1SL	229	T3V2F4E1L
68	T3V2F5E1SL	230	T3V2F5E1L
69	T3V2F6E1SL	231	T3V2F6E1L
70	T3V2F7E1SL	232	T3V2F7E1L
71	T3V2F8E1SL	233	T3V2F8E1L
72	T3V2F9E1SL	234	T3V2F9E1L
73	T3V3F1E1SL	235	T3V3F1E1L
74	T3V3F2E1SL	236	T3V3F2E1L
75	T3V3F3E1SL	237	T3V3F3E1L
76	T3V3F4E1SL	238	T3V3F4E1L
77	T3V3F5E1SL	239	T3V3F5E1L
78	T3V3F6E1SL	240	T3V3F6E1L

Sin lesion		Lesionado	
Caso	Nombre	Caso	Nombre
122	T5V2F5E1SL	284	T5V2F5E1L
123	T5V2F6E1SL	285	T5V2F6E1L
124	T5V2F7E1SL	286	T5V2F7E1L
125	T5V2F8E1SL	287	T5V2F8E1L
126	T5V2F9E1SL	288	T5V2F9E1L
127	T5V3F1E1SL	289	T5V3F1E1L
128	T5V3F2E1SL	290	T5V3F2E1L
129	T5V3F3E1SL	291	T5V3F3E1L
130	T5V3F4E1SL	292	T5V3F4E1L
131	T5V3F5E1SL	293	T5V3F5E1L
132	T5V3F6E1SL	294	T5V3F6E1L
133	T5V3F7E1SL	295	T5V3F7E1L
134	T5V3F8E1SL	296	T5V3F8E1L
135	T5V3F9E1SL	297	T5V3F9E1L
136	T6V1F1E1SL	298	T6V1F1E1L
137	T6V1F2E1SL	299	T6V1F2E1L
138	T6V1F3E1SL	300	T6V1F3E1L
139	T6V1F4E1SL	301	T6V1F4E1L
140	T6V1F5E1SL	302	T6V1F5E1L
141	T6V1F6E1SL	303	T6V1F6E1L
142	T6V1F7E1SL	304	T6V1F7E1L
143	T6V1F8E1SL	305	T6V1F8E1L
144	T6V1F9E1SL	306	T6V1F9E1L
145	T6V2F1E1SL	307	T6V2F1E1L
146	T6V2F2E1SL	308	T6V2F2E1L
147	T6V2F3E1SL	309	T6V2F3E1L
148	T6V2F4E1SL	310	T6V2F4E1L
149	T6V2F5E1SL	311	T6V2F5E1L
150	T6V2F6E1SL	312	T6V2F6E1L
151	T6V2F7E1SL	313	T6V2F7E1L
152	T6V2F8E1SL	314	T6V2F8E1L
153	T6V2F9E1SL	315	T6V2F9E1L
154	T6V3F1E1SL	316	T6V3F1E1L
155	T6V3F2E1SL	317	T6V3F2E1L
156	T6V3F3E1SL	318	T6V3F3E1L
157	T6V3F4E1SL	319	T6V3F4E1L
158	T6V3F5E1SL	320	T6V3F5E1L
159	T6V3F6E1SL	321	T6V3F6E1L

Sin lesión		Lesionado		Sin lesión		Lesionado	
Caso	Nombre	Caso	Nombre	Caso	Nombre	Caso	Nombre
79	T3V3F7E1SL	241	T3V3F7E1L	160	T6V3F7E1SL	322	T6V3F7E1L
80	T3V3F8E1SL	242	T3V3F8E1L	161	T6V3F8E1SL	323	T6V3F8E1L
81	T3V3F9E1SL	243	T3V3F9E1L	162	T6V3F9E1SL	324	T6V3F9E1L

Además se han realizado los siguientes modelos:

Por último, para estudiar la influencia de los edificios colindantes, se han realizado 11 modelos

Caso	Descripción
M1	Edificio aislado. Forjado rígido. Sin lesiones.
M2	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado rígido. Sin lesiones.
M3	Edificio aislado. Forjado rígido. Lesiones entre muro de carga y de atado.
M4	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado rígido. Lesiones entre muro de carga y de atado.
M5	Edificio aislado. Forjado rígido. Lesiones entre muro de carga y de atado y entre forjado y muros de atado.
M6	Edificio aislado. Forjado flexible. Sin lesiones.
M7	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado flexible. Sin lesiones.
M8	Edificio aislado. Forjado flexible. Lesiones entre muro de carga y de atado.
M9	Edificio aislado. Forjado flexible. Lesiones entre muro de carga y de atado y entre forjado y muros de atado.
M10	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado flexible. Lesiones entre muro de carga y de atado.
M11	Edificio con manzana. Medianera común. Forjado flexible. Lesiones entre muro de carga y de atado y entre forjado y muros de atado.

6. Resultados: Influencia de los distintos parámetros en el resultado del análisis modal mediante MEF

6. Resultados: Influencia de los distintos parámetros en el resultado del análisis modal mediante MEF.

6.1 Rango de frecuencias

El método de cálculo va a estar basado en PSD por lo que es importante definir el rango de frecuencias de cálculo.

El rango inferior siempre va a ser cero, ya que las lesiones pueden originar frecuencias muy bajas.

Para definir el rango superior se ha utilizado el resultado del análisis modal, consultando con que rango máximo de frecuencia se consigue movilizar el 90% de la masa del edificio en las direcciones X e Y.

Como el cálculo modal es bastante rápido, se han realizado algunos análisis previos en donde se han estimado los 1000 primeros modos. Se ha podido comprobar en estos modelos que los modos muy altos movilizan muy poca masa.

En el resto de modelos se han estimado los 200 primeros modos. Y se ha comprobado que en todos los casos se moviliza más del 90% de la masa con un conjunto de frecuencias inferiores a 50 Hz.

Si nos centramos en los primeros modos fundamentales en cada dirección, encontramos que **el primer modo X y el primer modo Y movilizan aproximadamente un 65% de la masa del edificio a una frecuencia entre 5 y 10 Hz.**

Como se mostrará más adelante, las lesiones introducen en las gráficas picos situados en el rango de bajas frecuencias.

En las tablas siguientes (Tabla 6–1 y Tabla 6–2) se recoge un resumen de los resultados obtenidos en el estudio de edificios con y sin lesiones. Como puede comprobarse en ellas, en la mayoría de los casos, el rango de frecuencias es incluso inferior a 40 Hz.

Por último, recalcar que según se ha expuesto anteriormente, la finalidad de esta tesis es servir de ayuda en la realización de ensayos en edificios reales. El planteamiento para esos ensayos es que se realicen con excitación ambiental, pero con esta excitación es difícil detectar frecuencias superiores a 15 Hz. Por ello, **el rango de valores para las gráficas PSD se ha fijado entre 0 y 20 Hz**

Tabla 11–1: Resumen de los resultados modales de los seis tipos de edificios, en su configuración 2 (dimensiones medias) y con los forjados tipo 1 (viguetas de madera y tablazón de madera) y 6 (viguetas de acero y revoltón cerámico), con el edificio sin lesiones.

Modelos sin lesiones						
Modelo	Modo	Freq.	Periodo	% masa movilizada		
		Hz	seg.	%X	%Y	%Z
T1V2F1E1SL	153	38,07	0,026	91,81	90,06	82,81
T2V2F1E1SL	44	35,69	0,028	90,35	90,04	85,41
T3V2F1E1SL	52	42,455	0,024	90,36	91,22	86,11
T4V2F1E1SL	77	28,985	0,035	90,44	90,19	83,71
T5V2F1E1SL	54	24,283	0,041	90,17	90,68	82,77
T6V2F1E1SL	105	37,17	0,027	90,09	90,13	87,10
T1V2F6E1SL	113	42,634	0,023	90,16	90,11	83,71
T2V2F6E1SL	52	33,022	0,030	90,00	90,08	85,63
T3V2F6E1SL	56	35,47	0,028	90,03	90,18	86,43
T4V2F6E1SL	58	26,584	0,038	90,70	91,10	85,17
T5V2F6E1SL	70	25,429	0,039	90,88	90,20	82,21
T6V2F6E1SL	94	35,854	0,028	90,09	90,32	87,19

Tabla 11–2: Resumen de los resultados modales de los seis tipos de edificios, en su configuración 2 (dimensiones medias) y con los forjados tipo 1 (viguetas de madera y tablazón de madera) y 6 (viguetas de acero y revoltón cerámico), con el edificio con lesiones.

Modelos con lesiones						
Modelo	Modo	Freq.	Periodo	% masa movilizada		
		Hz	seg.	%X	%Y	%Z
T1V2F1E1L	236	37,328	0,027	91,95	90,09	82,78
T2V2F1E1L	114	50,679	0,020	90,04	92,54	85,03
T3V2F1E1L	77	42,83	0,023	90,23	90,2	83,9
T4V2F1E1L	122	30,443	0,033	91,94	90,01	84,59
T5V2F1E1L	115	38,412	0,026	92,89	90,04	83,11
T6V2F1E1L	102	39,04	0,026	90,04	90,36	85,96
T1V2F6E1L	181	42,537	0,024	90,03	90,35	83,85
T2V2F6E1L	98	40,028	0,025	90,06	90,60	85,35
T3V2F6E1L	98	41,295	0,024	90,40	90,05	84,74
T4V2F6E1L	182	33,907	0,029	92,50	90,01	85,18
T5V2F6E1L	139	37,798	0,026	93,07	90,12	84,12
T6V2F6E1L	145	38,329	0,026	90,74	91,25	86,91

6.2 Interpretación de las gráficas PSD

Como se expuso en el punto 4.2.1, la gráfica PSD muestra cómo se distribuye la potencia de una señal (en este caso de la respuesta del edificio) a lo largo de las distintas frecuencias que la componen.

La gráfica está asociada a un punto de la estructura y a una dirección. Por ello, los puntos de máxima ordenada no siempre coinciden con los modos que movilizan más masa.

En los apartados siguientes los modelos se definirán mediante las siguientes siglas:

- Tipo geométrico: T1 a T6 (descritos en 5.1)
- Variante dimensional: V1 a V3 (descritos en 5.2)
- Tipo de forjado: F1 a F9 (descritos en 5.2 y Anejo 2)
- Módulo de elasticidad de los muros: E1 y E2 (descritos en 5.2)
- Situación (lesionado o no): SL, L1 o L2 (según fig. 4-36)

Si analizamos la Tabla 6–3 correspondiente al modelo tipo 1, variante 1 con forjado tipo 1 (T1V1F1E1SL), nos encontramos los siguientes modos:

Tabla 11–3: Caso T1V1F1E1SL. Resultados análisis modal.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
OutputCase	StepNum	Period	Frequency	UX	UY	UZ
Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	1	0,12528	7,9821	68,3330%	0,0210%	0,0000%
MODAL	2	0,101638	9,8389	0,0410%	73,0160%	0,0009%
MODAL	3	0,09751	10,255	0,4380%	0,0530%	0,0000%
MODAL	4	0,084646	11,814	0,1410%	0,0065%	0,0000%
MODAL	5	0,07632	13,103	7,9900%	0,0540%	0,0000%
MODAL	6	0,073759	13,558	0,0390%	2,2990%	0,0019%
MODAL	7	0,066212	15,103	0,0170%	1,4660%	0,0000%
MODAL	8	0,064304	15,551	0,2990%	0,0009%	0,0000%
MODAL	9	0,055851	17,905	0,0027%	0,0011%	0,0000%

En la columna StepNum encontramos el modo, y en Ux, Uy, Uz, el porcentaje de masa movilizada. Vemos que el modo 1 moviliza el 68,3% de masa en dirección X, mientras que el modo 2 moviliza el 73,01% de la masa del edificio en dirección Y.

En la Fig 6–1 que corresponde a los resultados PSD de un punto en la cubierta del modelo descrito, en dirección Y, vemos que el modo 1 (asociado a la dirección X) se muestra de una forma muy sutil. El modo 2 (asociado a la dirección Y) tiene más amplitud, pero el modo 4 presenta la máxima amplitud para el rango de frecuencias 0-18 Hz.

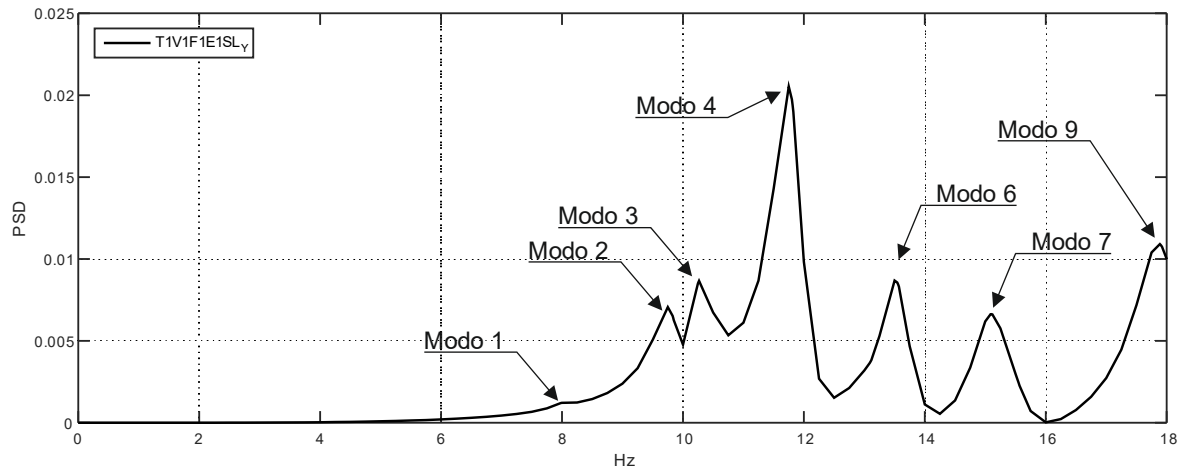


Fig 11-1: Gráfica PSD correspondiente a la dirección Y del modelo de edificio tipo 1, variante dimensional 1 con tipo de forjado 1, modulo de elasticidad bajo para los muros (700 MPa), sin lesiones.

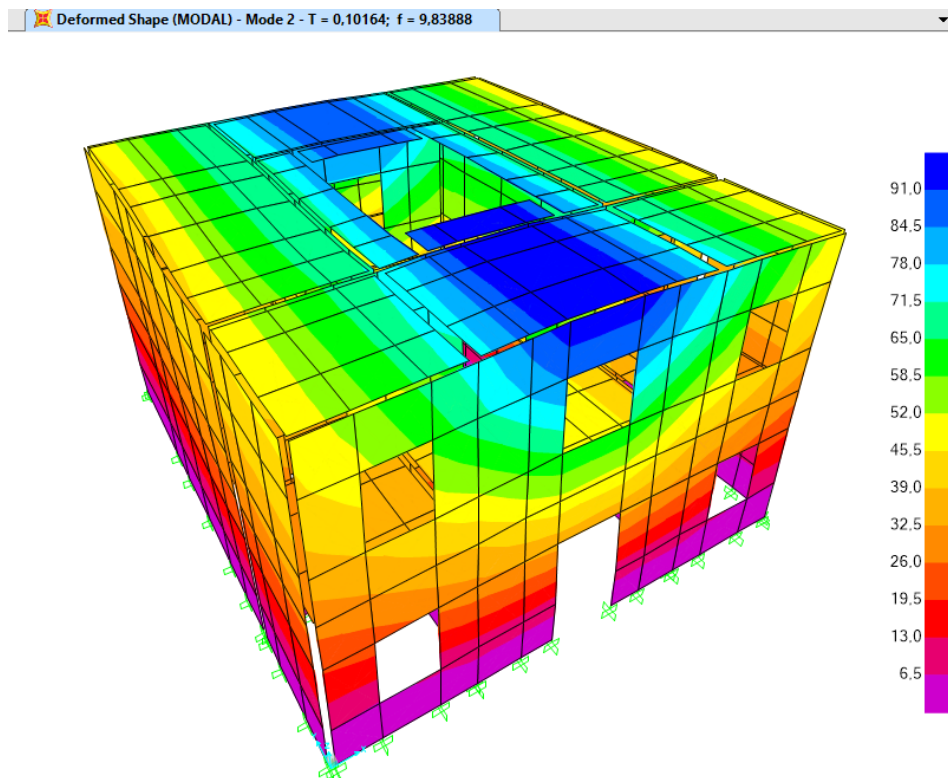


Fig 11-2: Gráfica de desplazamientos modales correspondientes al modo 2 del modelo T1V1F1E1SL

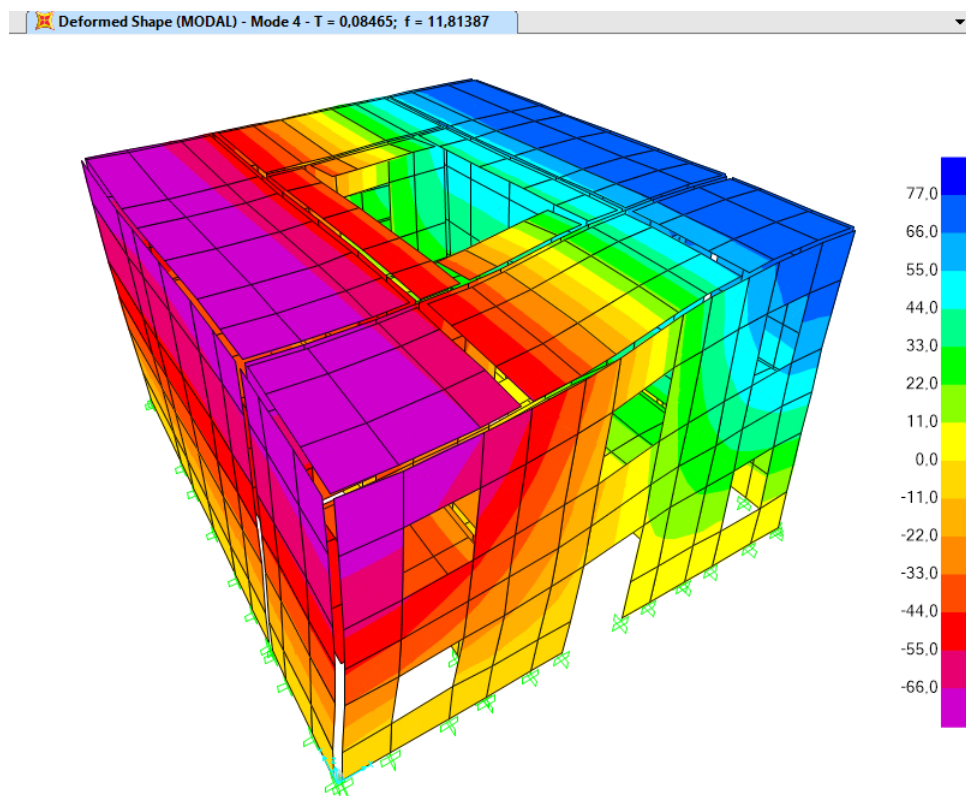


Fig 11-3: Gráfica de desplazamientos modales correspondientes al modo 4 del modelo T1V1F1E1SL

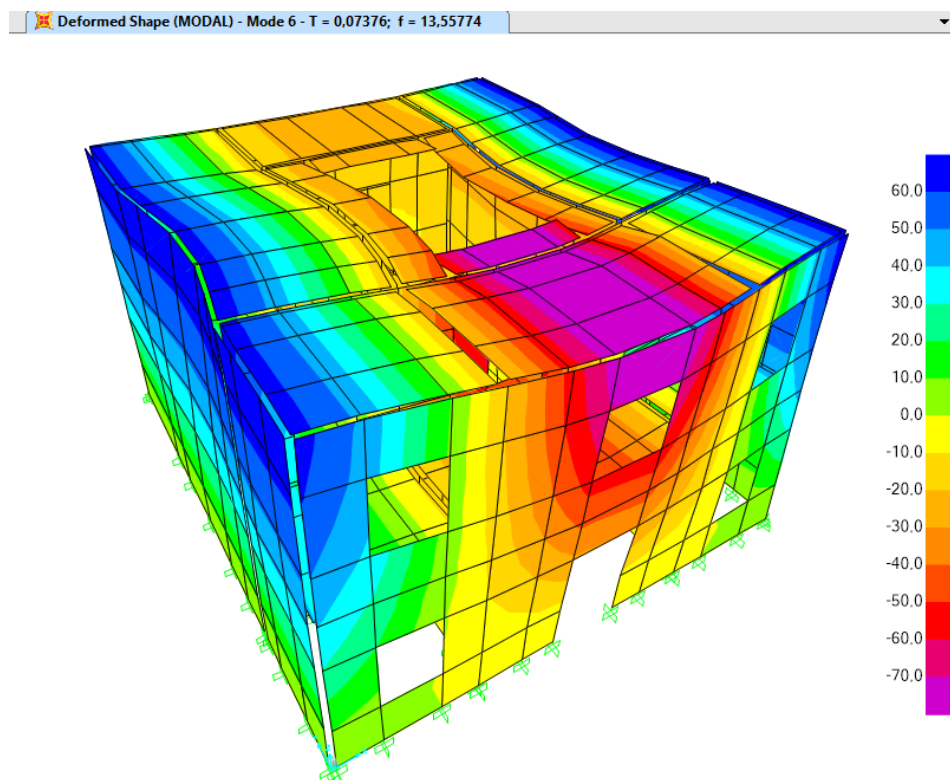


Fig 11-4: Gráfica de desplazamientos modales correspondientes al modo 6 del modelo T1V1F1E1SL

Si observamos las gráficas de desplazamientos modales del modelo en las Fig 6–2 a Fig 6–4, apreciamos que el máximo desplazamiento en la esquina superior izquierda, lo encontramos en la figura Fig 6–3 correspondiente al modo 4, tal como se había apreciado en la gráfica PSD.

Al revisar las gráficas PSD es importante tener en cuenta que las máximas amplitudes de la gráfica PSD están asociadas a un punto y una dirección concreta.

6.3 Influencia del tipo geométrico

En la tabla 4-1, del apartado 4.1.2, observamos que para el modelo tipo 1, variante 2, la fórmula simplificada de la norma española estimaba una frecuencia del primer modo fundamental de 19,92 Hz. Sin embargo, en el apartado 2.3.4.1 vimos que la fórmula no incluía información acerca del número y espesor de los muros, de la distribución de los mismos o del tipo de forjado.

En las fórmulas más simples de otras normas la frecuencia fundamental rondaba los 4 Hz. Y en las fórmulas más complejas, como las de Eurocódigo 8, la frecuencia se estima en 30 Hz.

Tras calcular mediante elementos finitos el modelo T1V8F1E1SL vemos que el primer modo fundamental aparece en una frecuencia de 7,9 Hz y corresponde a la dirección X, mientras que el segundo modo, correspondiente a la dirección Y, aparece en 9,54 Hz. No conviene olvidar que las tablas de las normas suelen estar preparadas para obra nueva, en cuyo caso el módulo de elasticidad será más alto.

En este caso la fórmula que más se acerca a los valores obtenidos es la de la norma peruana E.030

Puede ser interesante comprobar como varían los resultados al cambiar el tipo geométrico.

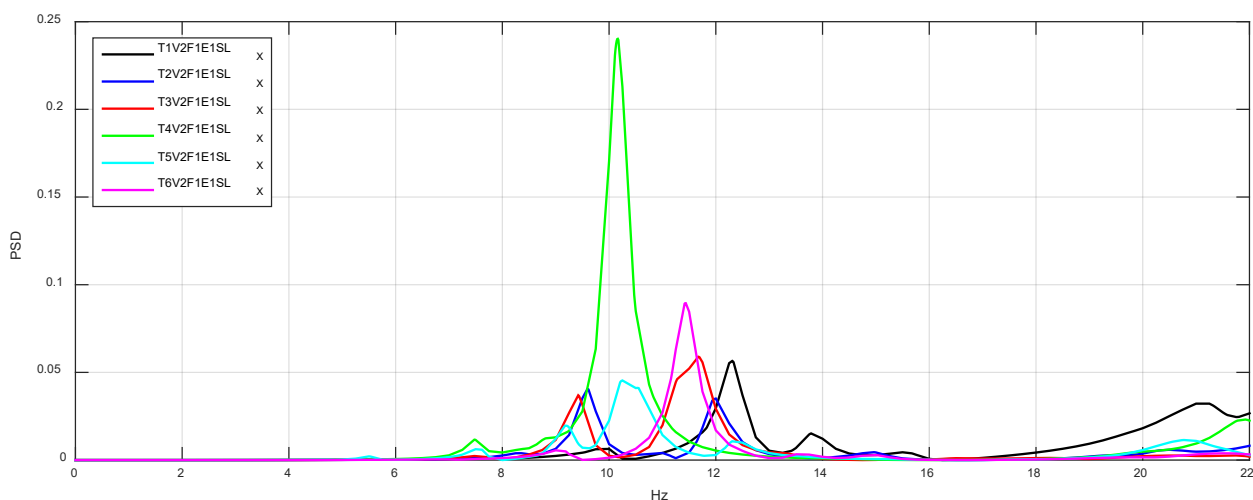


Fig 11–5: Gráfica de resultados de densidad espectral de potencia (PSD) correspondientes a los modelos con forjado mas deformable (F1) en la dirección X

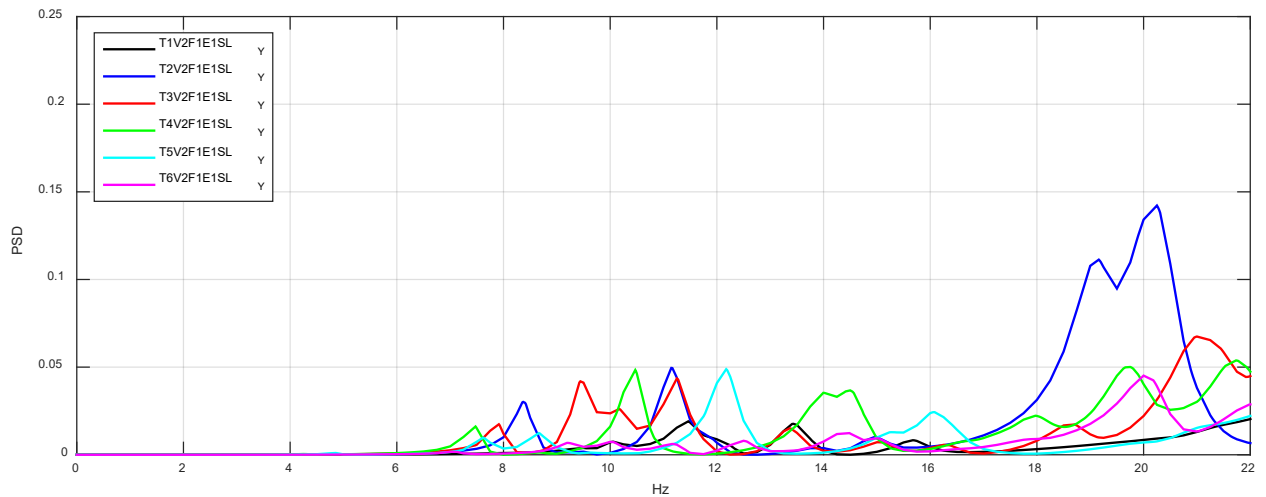


Fig 11-6: Gráfica PSD correspondientes a los modelos con forjado mas deformable (F1) en la dirección Y

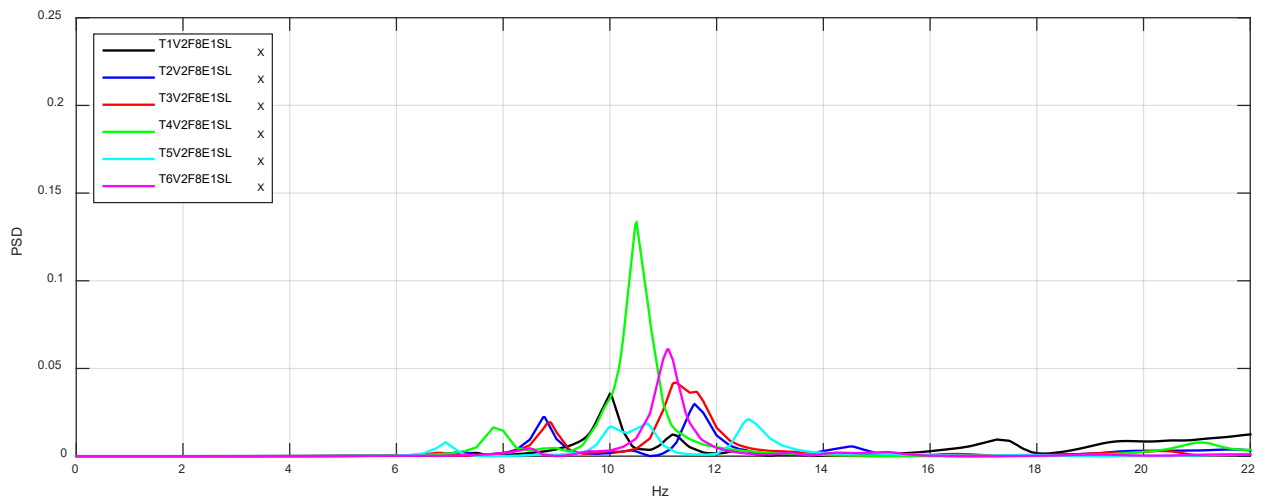


Fig 11-7: Gráfica PSD correspondientes a los modelos con forjado mas rígido (F8) en la dirección X

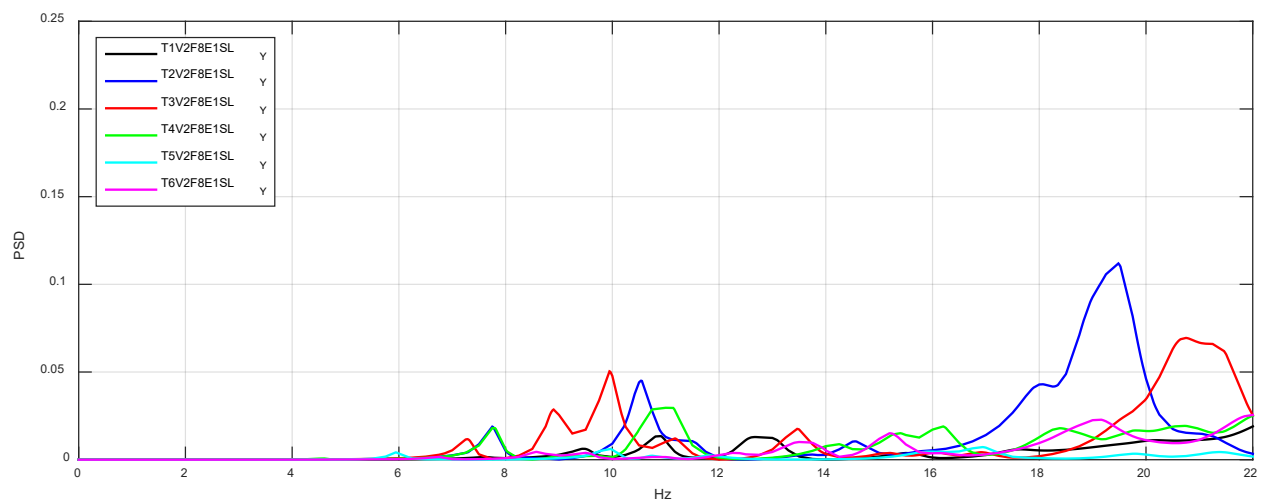


Fig 11-8: Gráfica PSD correspondientes a los modelos con forjado mas rígido (F8) en la dirección Y

En las Fig 6–5 a Fig 6–8 se superponen las gráficas PSD de los distintos tipos manteniendo el tipo de forjado y el módulo de elasticidad de los muros, con el objeto de ver la influencia de la geometría del edificio. Para reducir el número de gráficas se ha creído conveniente representar la variante 2 de cada tipo, que corresponde a dimensiones intermedias.

En las Fig 6–5 y Fig 6–6 se representan las direcciones X e Y de los casos con un forjado mas deformable (F1), mientras que en las Fig 6–7 y Fig 6–8 se representan los casos con un forjado más rígido (F8).

No parece posible obtener una estadística fiable de estas gráficas ya que los cambios no siguen un patrón claro.

Lo que sí puede apreciarse es que el rango de las primeras frecuencias comienza en torno a 5 Hz en los tipos 4 y 5, y llega hasta 9,5 en el tipo 1. Estos resultados pueden ser interesantes ya que permiten establecer unos límites. Sin embargo, como veremos en el punto 6.9, en las gráficas con el edificio lesionado aparecen picos importantes en frecuencias de menos de 2 Hz.

6.4 Influencia de las dimensiones espaciales

En las Fig 6–9 a Fig 6–14 se superponen las gráficas PSD de un mismo tipo, con el mismo forjado y con distintas variantes dimensionales (V1, V2 y V3), descritas en 5.2. Se pretende ver cómo y cuánto influye este parámetro.

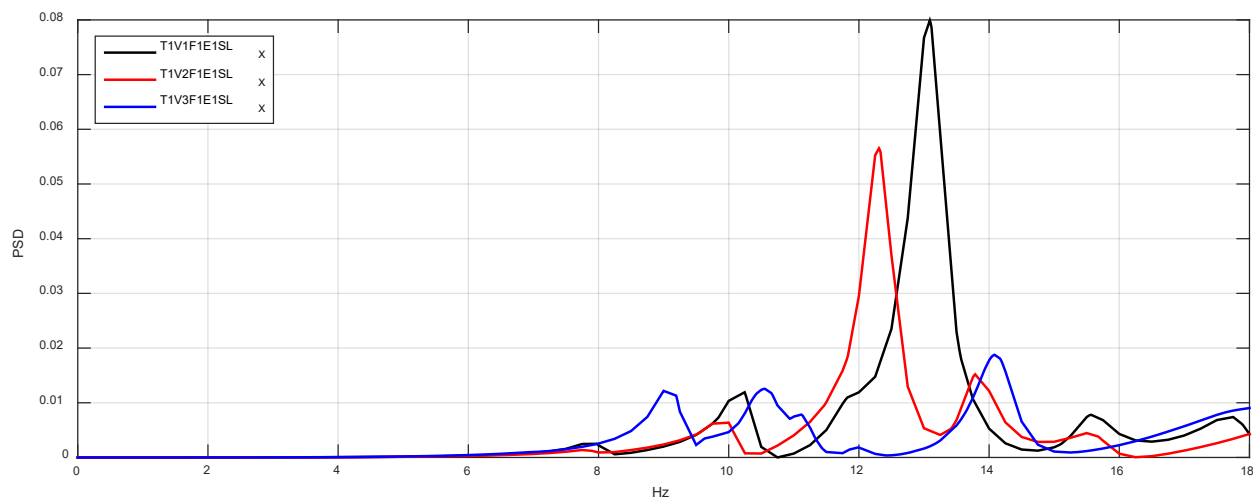


Fig 11–9: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 1 con forjado mas flexible (F1) en la dirección X

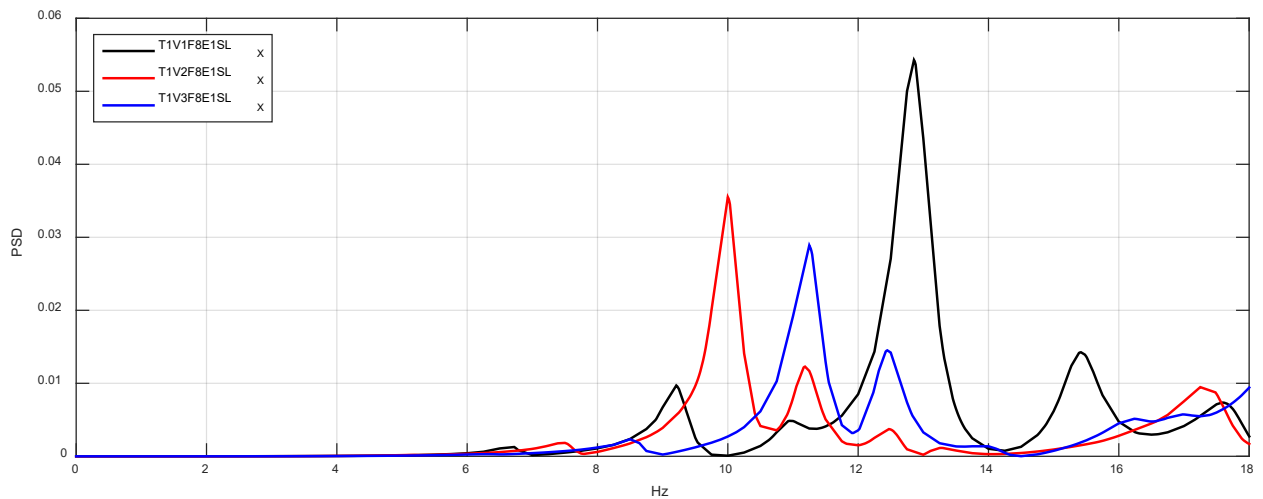


Fig 11-10: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 1 con forjado mas rígido (F8) en la dirección X

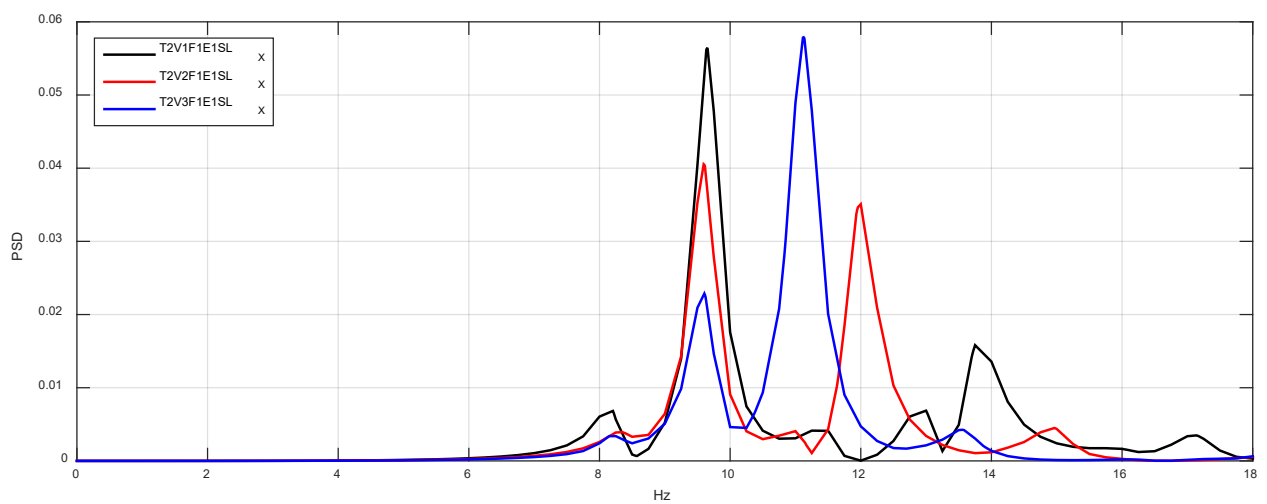


Fig 11-11: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 2 con forjado mas flexible (F1) en la dirección X

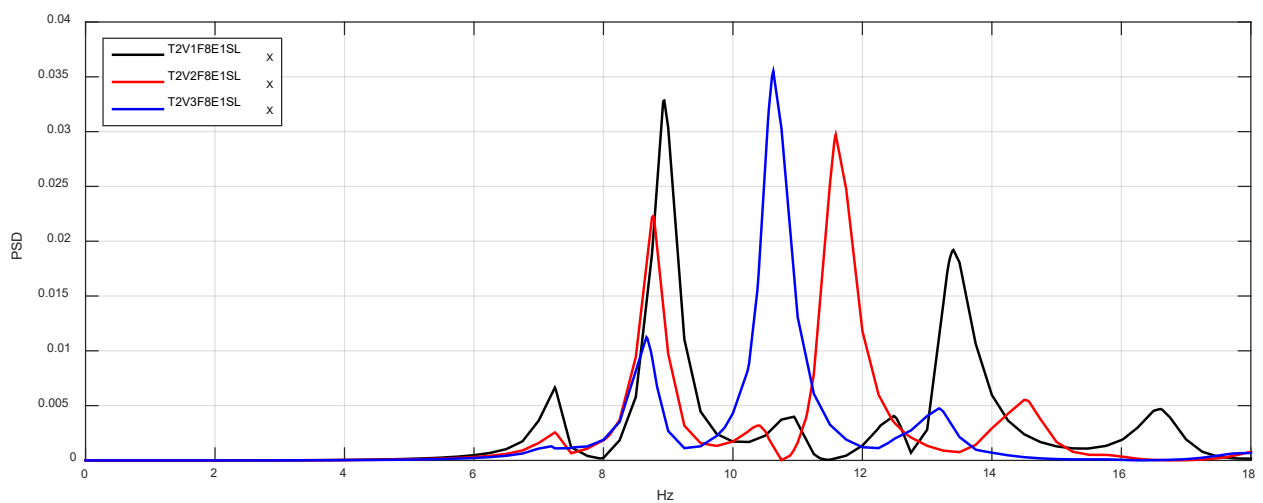


Fig 11-12: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 2 con forjado mas rígido (F8) en la dirección X

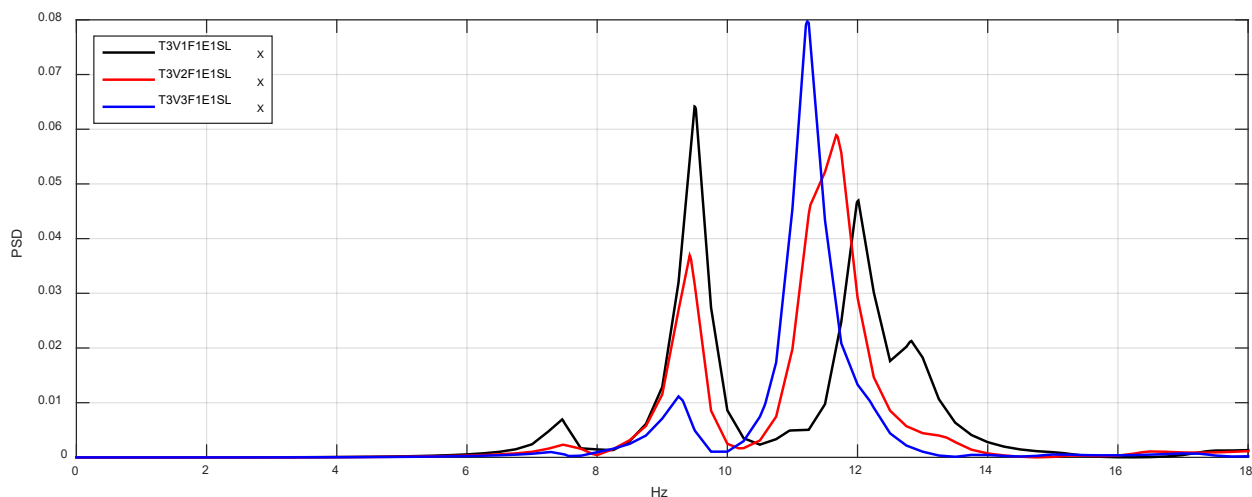


Fig 11-13: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 2 con forjado mas flexible (F1) en la dirección X

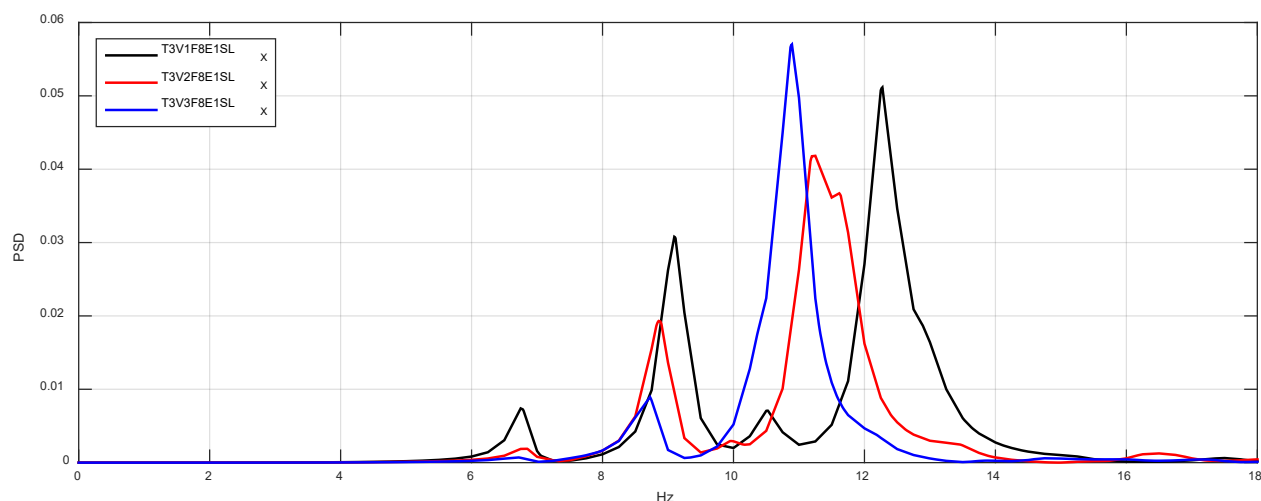


Fig 11-14: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 2 con forjado mas rígido (F8) en la dirección X

Como ha ocurrido en los puntos anteriormente estudiados, la amplitud no es significativa, ya que al aumentar las dimensiones unas veces incrementa y otras veces decrece el valor PSD. Sin embargo si comprobamos que las frecuencias están muy agrupadas. En la Tabla 6-4 vemos que la desviación estándar de la muestra en la que se incluyen todas las variantes de dos tipos de forjados tiene una desviación estándar de entre 1,19 y 1,91 Hz.

Si comparamos las desviaciones discriminando el tipo de forjado, podemos ver en la Tabla 6-5 que en el forjado rígido, la desviación estándar oscila entre 0.23 y 0.29 Hz.

En base a esto, y a los datos de otros factores, se puede deducir que la influencia de las dimensiones de las crujías es despreciable.

Tabla 11-4: Resumen de frecuencias de las figuras Fig 6-9 a Fig 6-14

	Frecuencia									
	F1			F8			Min	Max	Media	Desv. estandar
	V1	V2	V3	V1	V2	V3				
T1	13,1	12,9	9,6	8,9	9,5	9,1	8,9	13,1	10,4	1,75
T2	12,3	10,0	9,6	8,8	9,4	8,9	8,8	12,3	9,8	1,19
T3	14,1	11,3	9,6	8,7	9,3	8,8	8,7	14,1	10,1	1,91

Tabla 11-5: Resumen de frecuencias de las figuras Fig 6-9 a Fig 6-14 según tipo de forjado

F1		F8	
Media	Desv. estandar	Media	Desv. estandar
11,8	1,57	9,2	0,23
10,6	1,19	9,0	0,29
11,5	1,85	8,9	0,26

6.5 Influencia del módulo de elasticidad de los muros

En las Fig 6–15 a Fig 6–22 se superponen las gráficas PSD de un mismo modelo, en el que se ha modificado el módulo de elasticidad. E1 corresponde a un módulo de elasticidad de 700 MPa, mientras que E2 corresponde a un módulo de elasticidad de 1500 MPa. Se pretende ver cómo y cuánto influye el cambio de este parámetro.

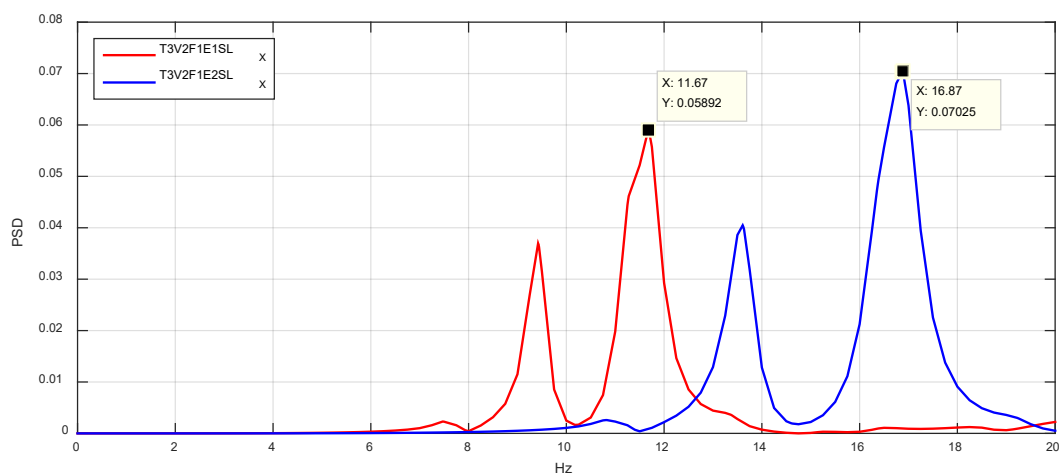


Fig 11–15: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado flexible (F1) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección X

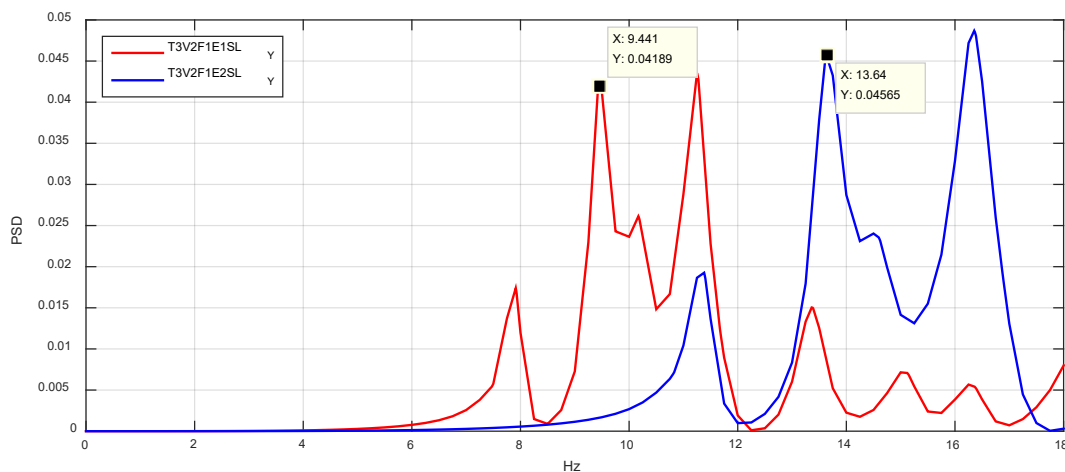


Fig 11–16: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado flexible (F1) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección Y

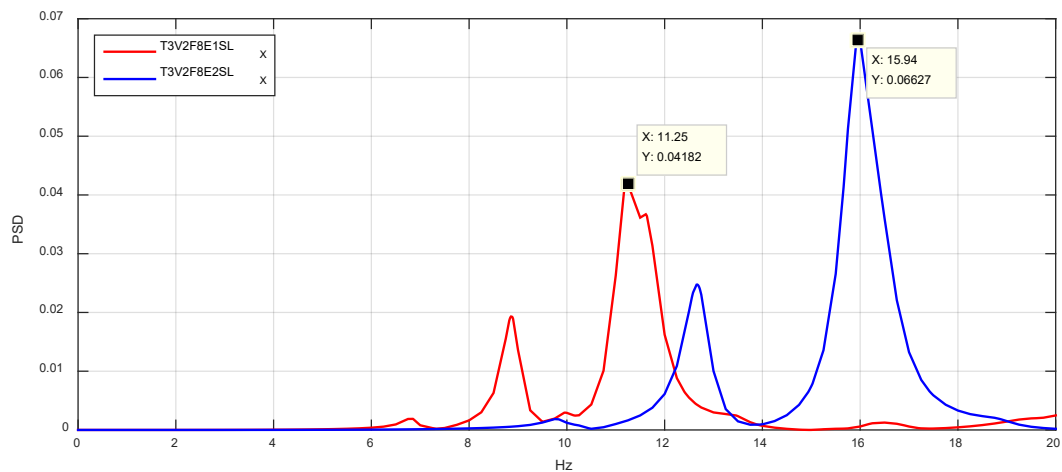


Fig 11-17: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado rígido (F8) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección X

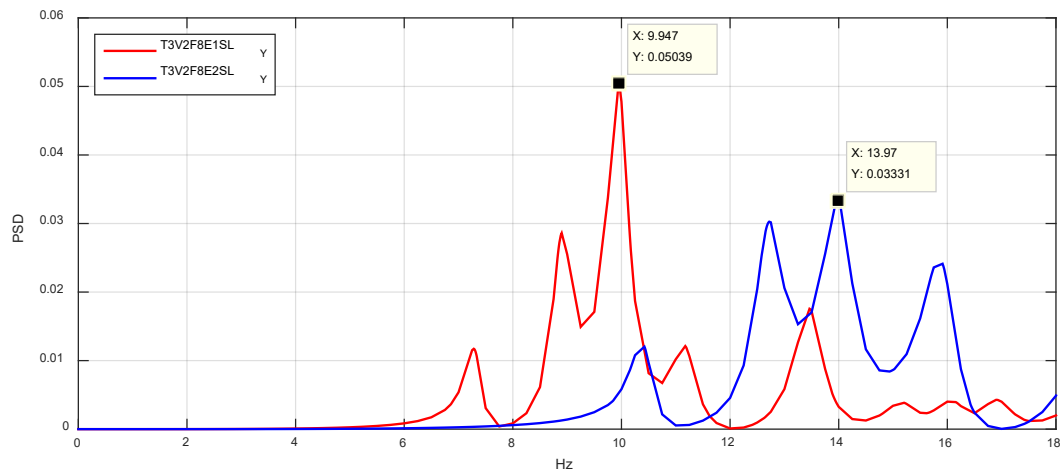


Fig 11-18: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado rígido (F8) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección Y

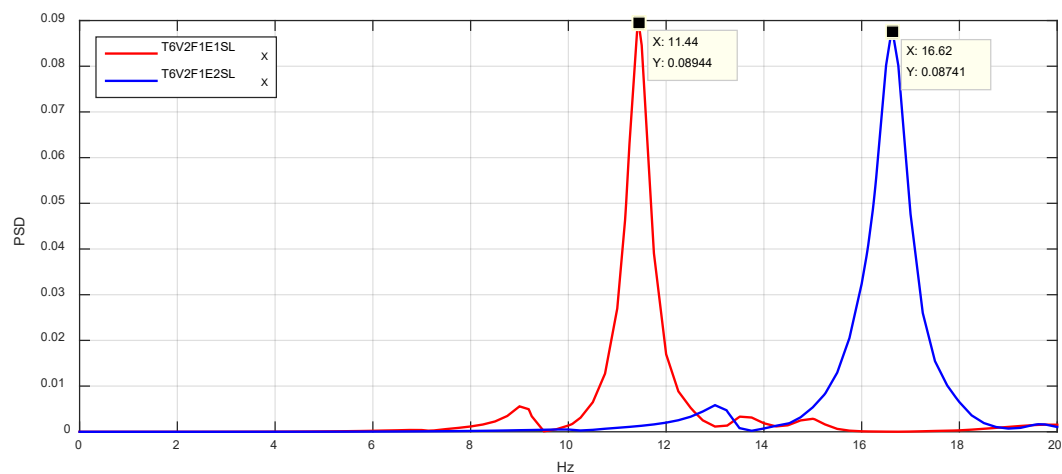


Fig 11-19: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado flexible (F1) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección X

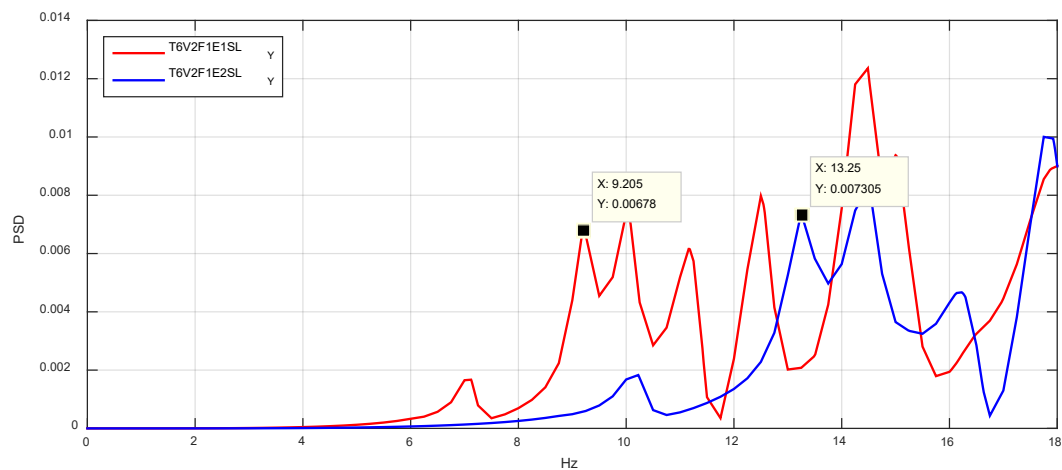


Fig 11-20: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado flexible (F1) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección Y

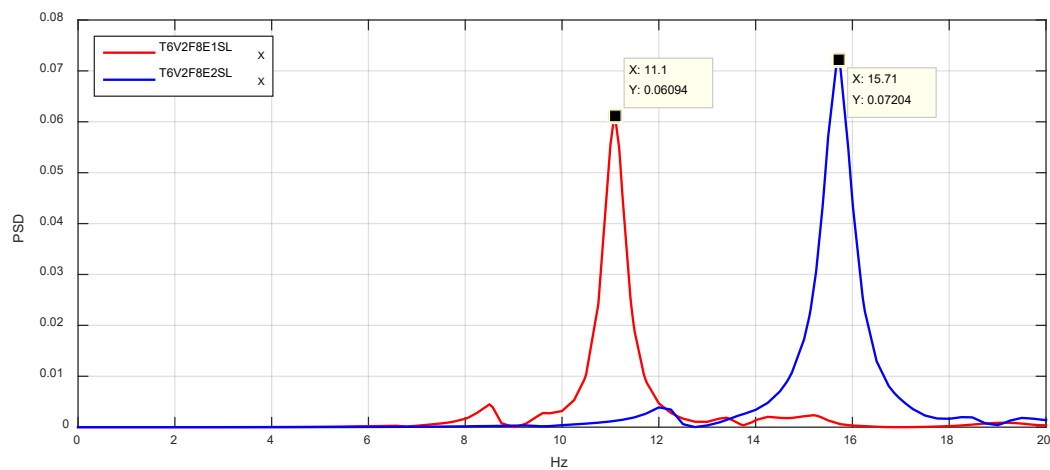


Fig 11-21: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 6 con forjado rígido (F8) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección X

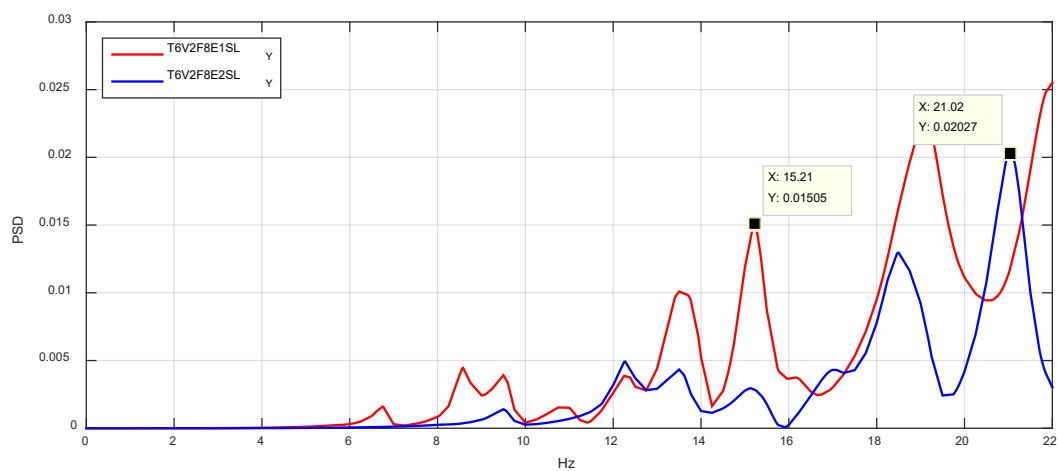


Fig 11-22: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 6 con forjado rígido (F8) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección Y

Si nos fijamos en las ordenadas, vemos que los cambios no siguen un patrón, unas veces el cambio hace que la amplitud suba mientras que en otros casos ésta se mantiene o incluso baja.

Pero si dividimos las frecuencias de los modelos con el módulo de elasticidad alto (E2) por las de módulo bajo (E1), obtenemos un factor entre 1,38 y 1,45 (ver Tabla 6–6).

Tabla 11–6: Resumen de frecuencias en modelos con diferente módulo de elasticidad

	Frecuencia X			Frecuencia Y		
	Mod. Elast.	Mod. Elast.	Factor F2/ F1	Mod. Elast.	Mod. Elast.	Factor F2/ F1
	1	2		1	2	
T3V2F1	11,67	16,87	1,446	9,44	13,64	1,445
T3V2F8	11,25	15,94	1,417	9,947	13,97	1,404
T6V2F1	11,44	16,62	1,453	9,205	13,25	1,439
T6V2F8	11,1	15,71	1,415	15,21	21,02	1,382

Dicho factor es similar a 1,46 que en este caso coincide con el valor de la raíz cuadrada del factor de escala del módulo de elasticidad alto con respecto al bajo.

$$n = E2/E1 = 1500/700 = 2,14$$

$$\sqrt{n} = \sqrt{2,14} = 1,46$$

Como la frecuencia es función de la rigidez y de la masa ($F = \sqrt{K/M}$), se puede deducir que

$$F_{E2} \approx F_{E1} \cdot \sqrt{n}$$

Esta una conclusión es bastante lógica ya que resalta el hecho de que la rigidez horizontal de los edificios depende, sobre todo, de la rigidez de los muros, siendo la contribución de los forjados un factor menos influyente.

Aparte de esto, y dentro de unos valores normales del módulo de elasticidad, se puede despreciar la influencia de este parámetro en el problema que se está analizando.

6.6 Influencia del efecto tipo de forjado

En las fFig 6–23 a Fig 6–28 se ha estudiado cada tipo, con las mismas dimensiones (variante V2) y se han superpuesto las gráficas PSD correspondientes a distintos tipos de forjado. En este caso se pretende ver cómo y cuánto influye la rigidez y la masa del forjado en los resultados.

Tipos de forjado:

- F1: Viguetas de madera y tablazón de madera
- F2: Viguetas de madera y tablero de doble rasilla
- F3: Viguetas de madera y revoltón cerámico
- F4: Rollizo y tablazón de madera
- F5: Rollizo y tablero de doble rasilla
- F6: Viguetas de acero y revoltón cerámico
- F7: Viguetas de acero y bovedilla
- F8: Viguetas de hormigón y revoltón cerámico
- F9: Viguetas de hormigón y bovedilla

Al analizar cada una de las gráficas, vemos que las amplitudes disminuyen con la rigidez. Los forjados de viguetas de acero o de hormigón tienen menores valores PSD. Esta variación no va a ser significativa, ya que en los ensayos en edificios reales no vamos a controlar la intensidad de la acción exterior.

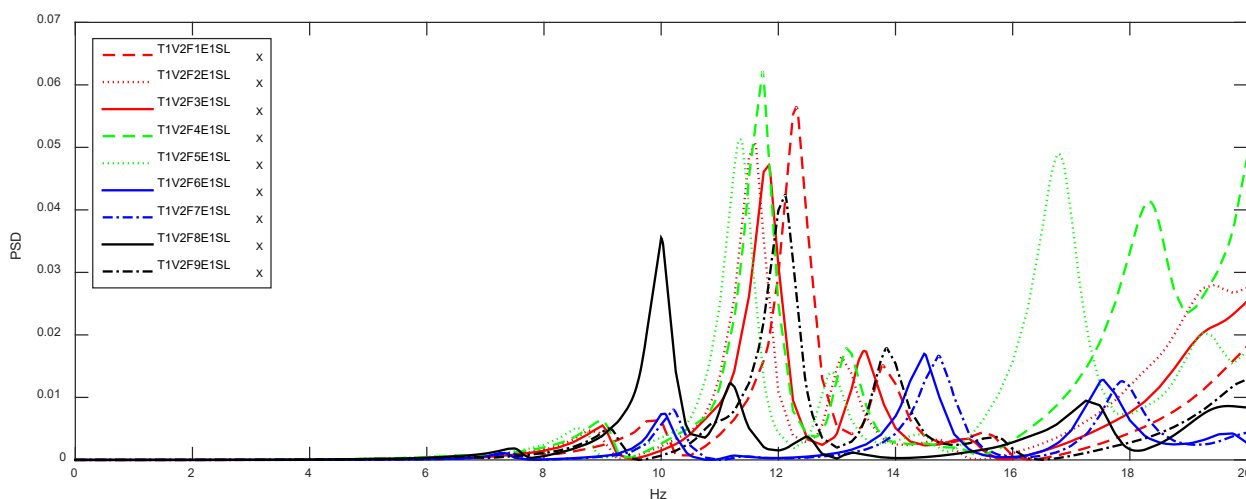


Fig 11–23: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X

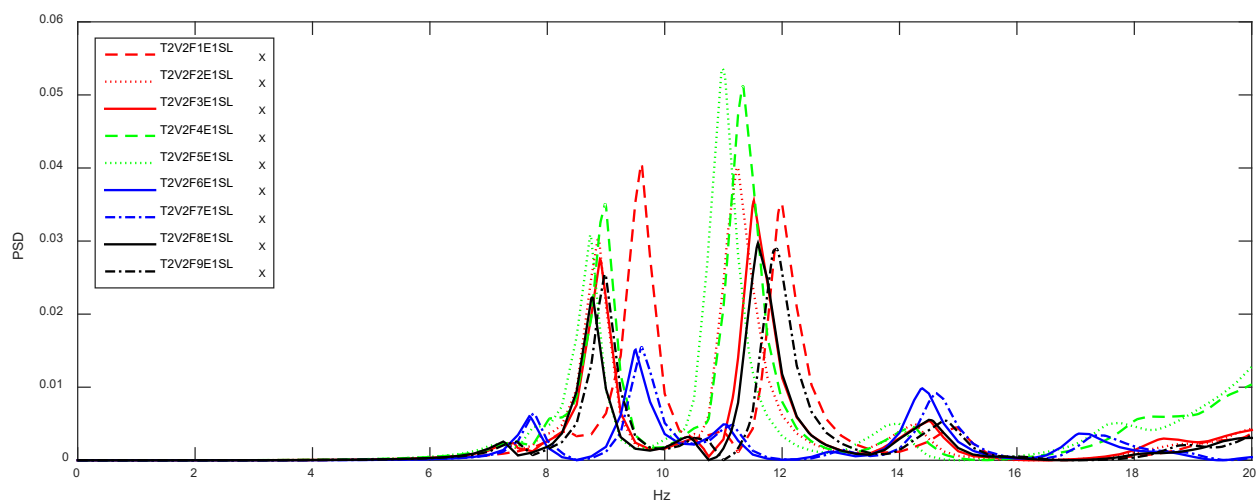


Fig 11-24: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 2, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X

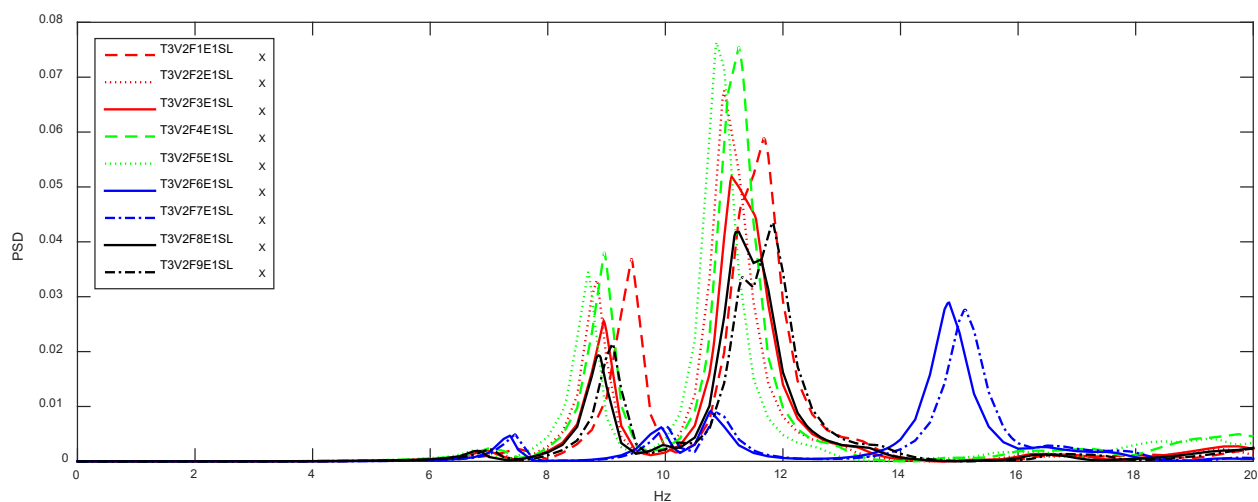


Fig 11-25: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 3, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X

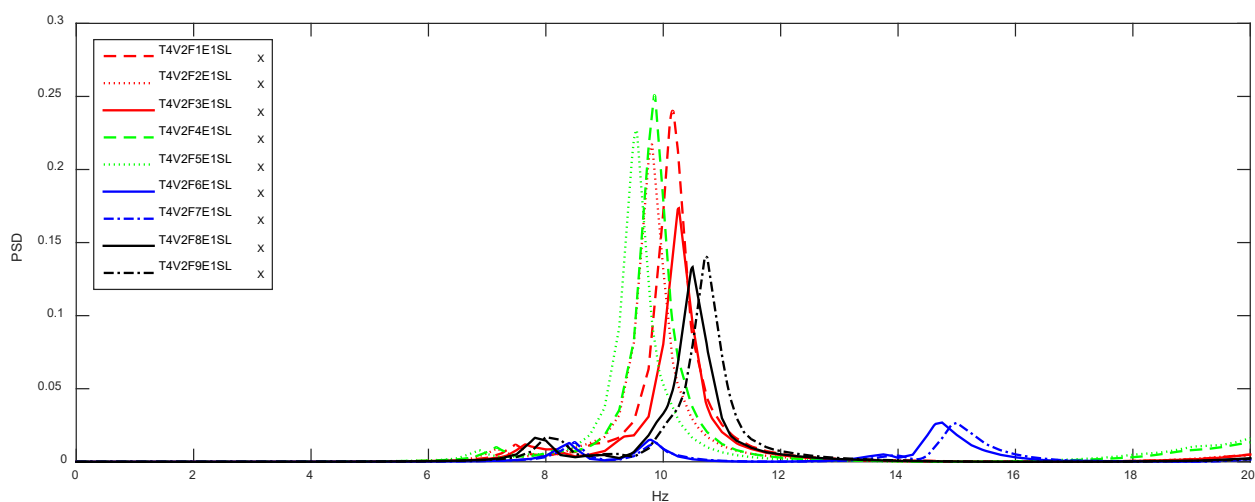


Fig 11-26: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 4, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X

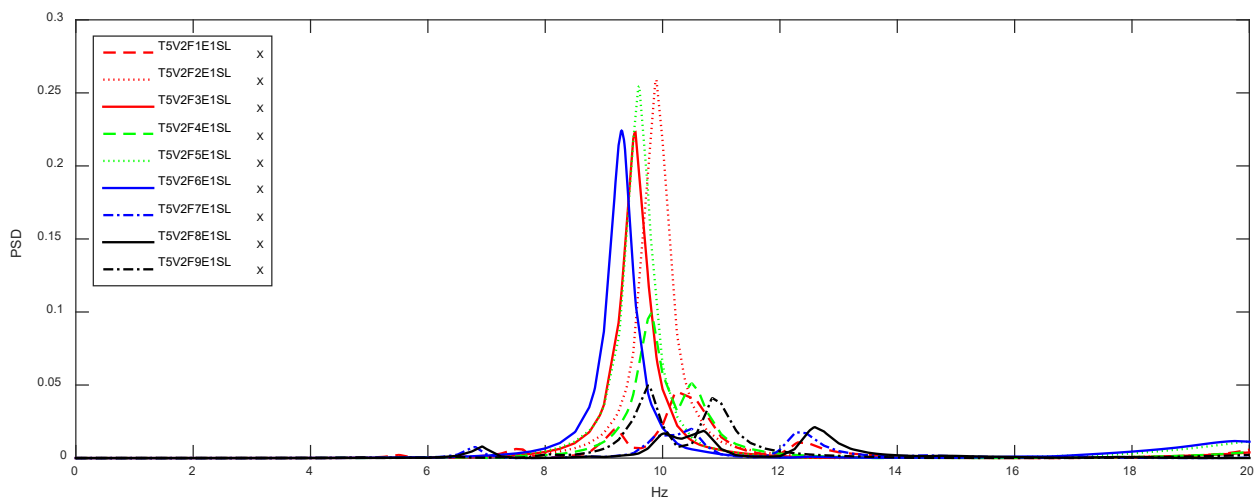


Fig 11-27: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 5, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X

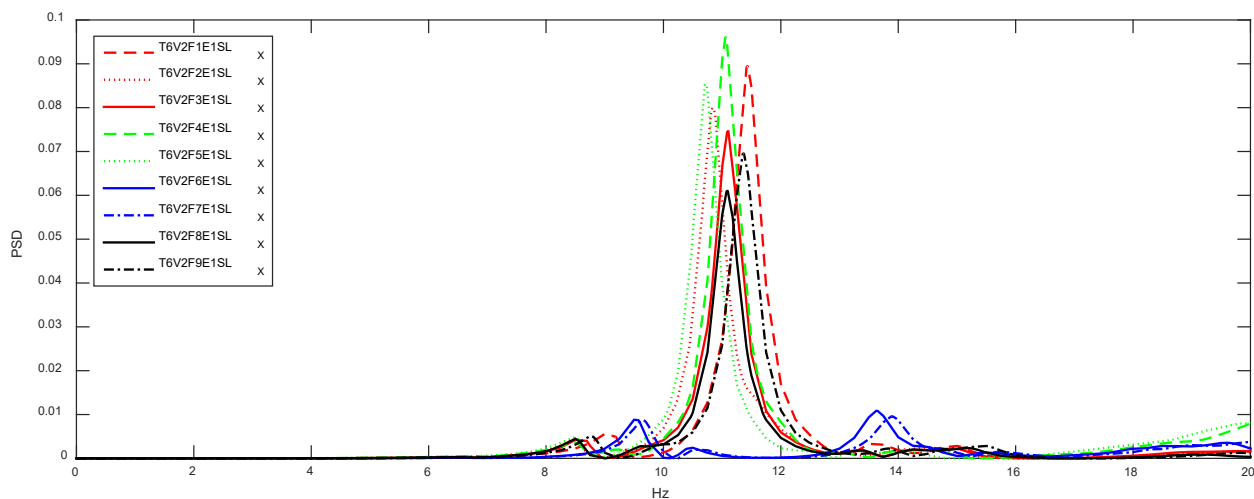


Fig 11-28: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 6, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X

Pero al estudiar las frecuencias, si introducimos las correspondientes a puntos singulares en una tabla (ver Tabla 6-7) podemos apreciar que hay poca variación. La desviación estándar dentro de cada tipo está en un rango entre 0,26 Hz para el tipo con menos variación y 0,66 Hz para el mas variable.

Por ello se deduce que para forjados poco rígidos en su plano (sin efecto diafragma), las características del forjado tienen poca influencia en el problema que estamos tratando.

Tabla 11–7: Resumen de frecuencias en modelos con diferente tipo de forjado

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	Min	Max	Me- dia	Desv. estan- dar
T1V2	12,3	11,6	11,8	11,7	11,3	11,2	11,2	10,0	12,2	10,0	12,3	11,5	0,65
T2V2	12,0	11,2	11,5	11,3	11,0	11,0	11,2	11,6	11,9	11,0	12,0	11,4	0,35
T3V2	11,7	11,0	11,2	11,3	10,9	10,2	10,2	11,2	11,3	10,2	11,7	11,0	0,46
T4V2	10,2	9,8	10,3	9,9	9,5	9,8	9,8	10,5	10,7	9,5	10,7	10,0	0,37
T5V2	9,3	9,9	9,5	9,8	9,6	9,3	9,3	10,0	9,8	9,3	10,0	9,6	0,26
T6V2	11,4	10,9	11,1	11,1	10,7	9,5	9,7	11,1	11,4	9,5	11,4	10,7	0,66

6.7 Influencia del efecto diafragma del forjado

En las Fig 6–29 a Fig 6–34 se ha estudiado cada tipo con las mismas dimensiones (variante V2) y se han superpuesto las gráficas PSD correspondientes modelos con forjado de viguetas de hormigón y bovedilla (tipo 9) y al mismo modelo, con micro-losa superior (tipo FD). Se pretende ver cómo y cuánto influye este parámetro.

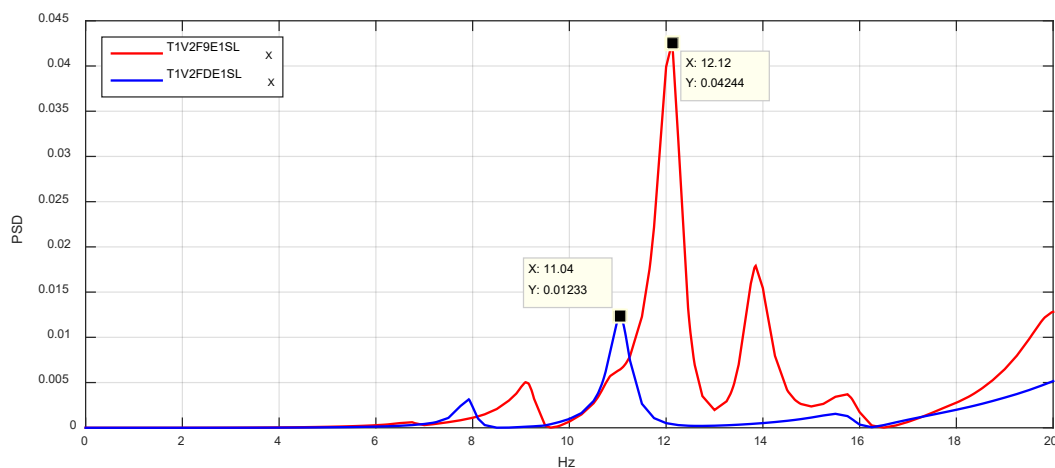


Fig 11–29: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)

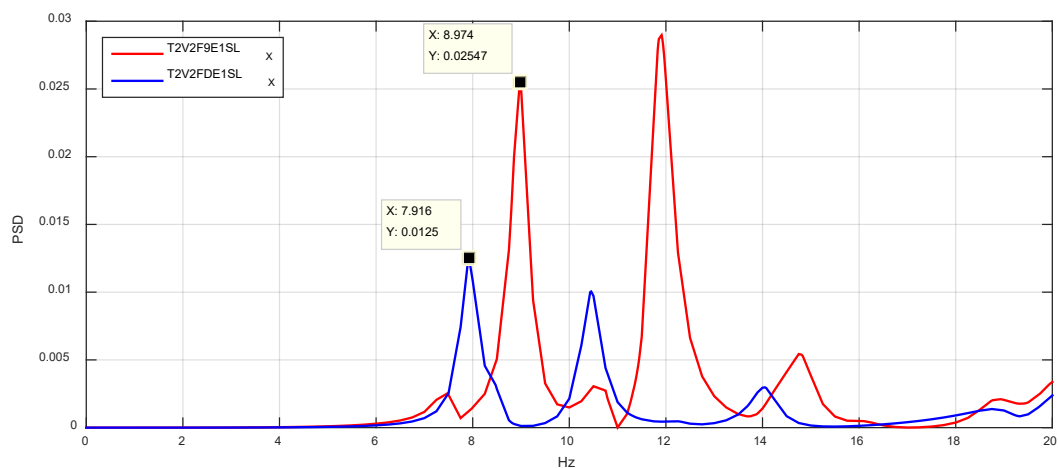


Fig 11–30: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 2, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)

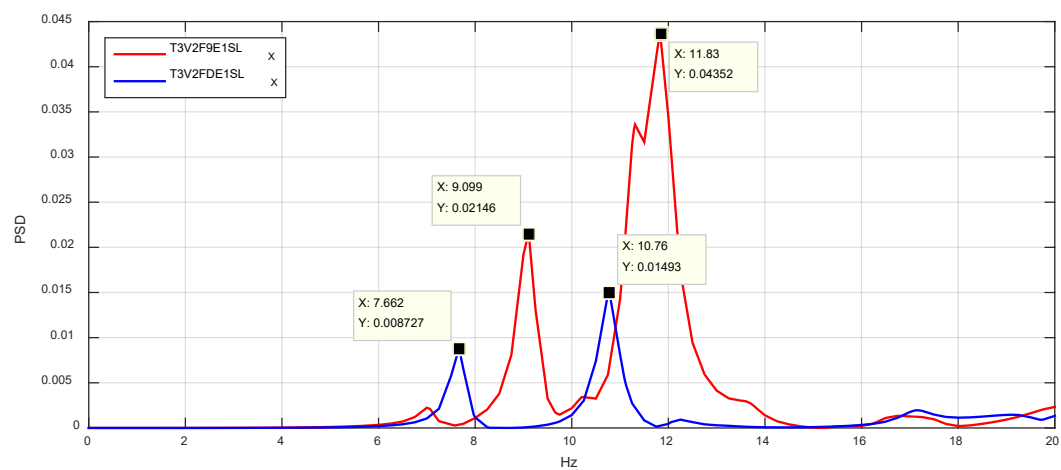


Fig 11–31: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 3, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)

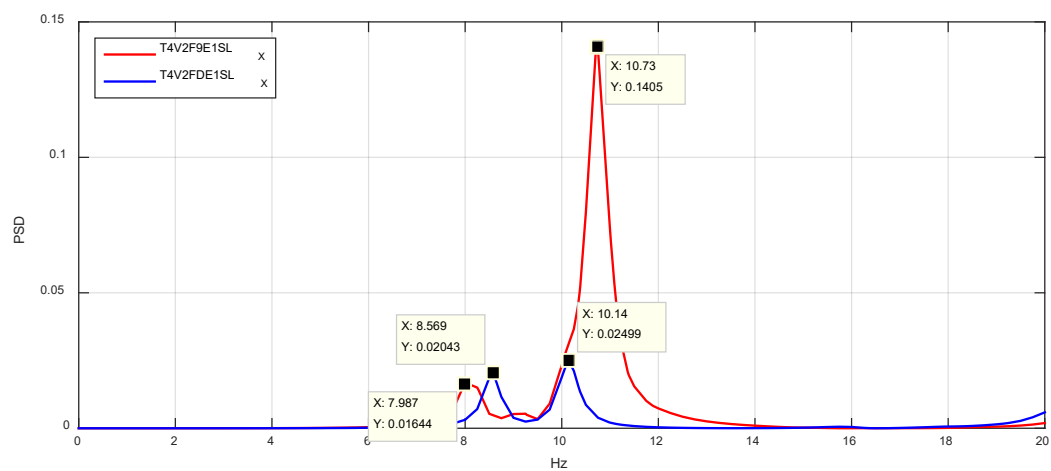


Fig 11–32: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 4, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)

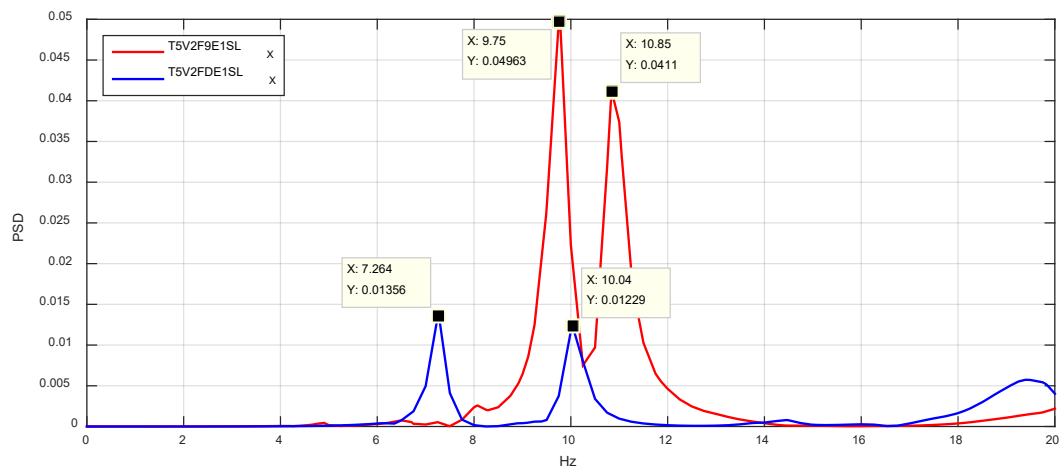


Fig 11-33: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 5, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 viga de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)

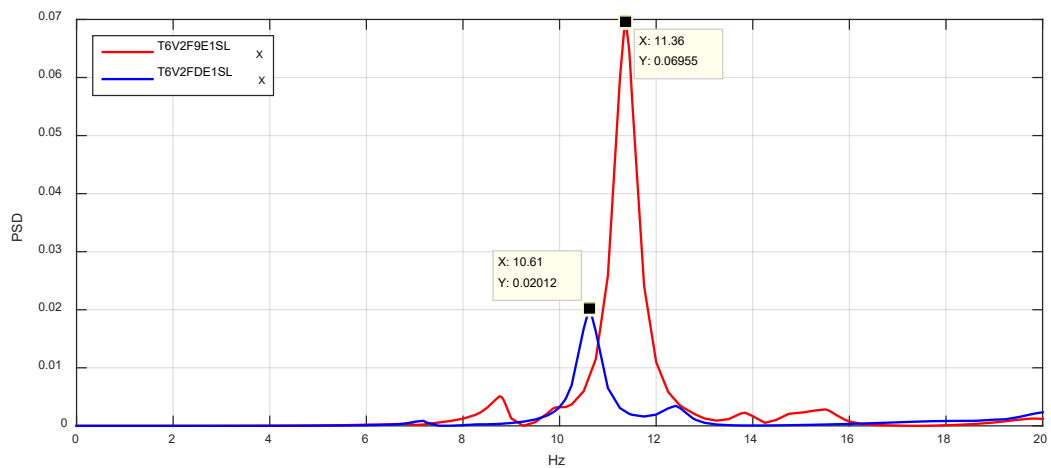


Fig 11-34: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 6, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 viga de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)

Se puede comprobar que al introducir el efecto diafragma la amplitud disminuye aproximadamente un 70%, con una dispersión estándar del 1 %. La frecuencia disminuye un 12%, con una dispersión estándar del 6,7%.

Por ello, el efecto diafragma tiene una influencia importante en el problema que tratamos, por lo que va a ser determinante para futuros ensayos in situ determinar si estamos en un caso con losa rígida superior.

6.8 Influencia de la manzana

En primer lugar estudiaremos las Fig 6–35, Fig 6–36, Fig 6–37 y Fig 6–38 correspondientes a los casos con forjado flexible.

Encontramos que cuando el forjado no tiene capa de compresión, sino que sólo presenta una tablazón de madera (sin efecto diafragma), aparece una diferencia importante de escala en la curva que representa a la respuesta en la dirección X (perpendicular a fachada). En la Fig 6–35, podemos apreciar esta diferencia entre el caso 6 (edificio aislado y sin lesiones) y el caso 9 (edificio con lesiones entre muros de carga y de atado y forjado desconectado de los muros de atado en primera crujía).

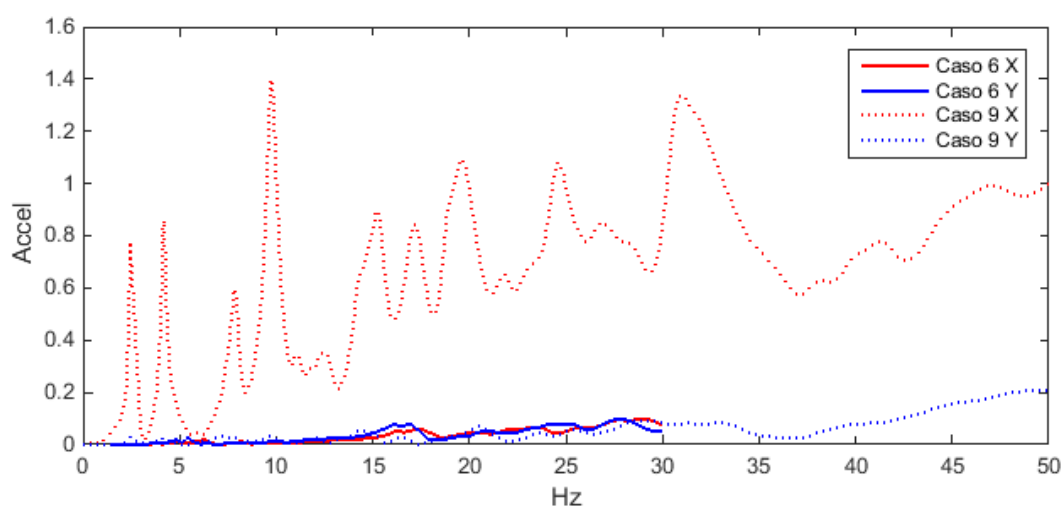


Fig 11–35: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 6 (edificio aislado con forjado flexible y sin lesiones) y 9 (edificio aislado, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).

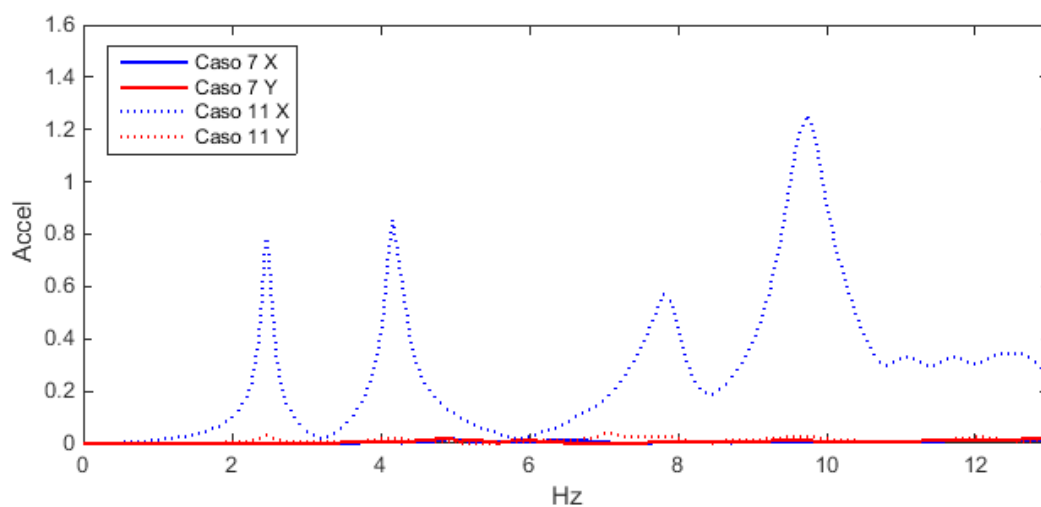


Fig 11–36: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 7 (edificio en manzana, con forjado flexible y sin lesiones) y 11 (edificio en manzana, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).

En la Fig 6–36 podemos apreciar como un estudio similar, pero en un modelo con manzana (casos 7 y 11), aparece la misma importante diferencia de escala en dirección X.

En la Fig 6–37 nos hemos centrado en la respuesta en dirección X (perpendicular a fachada) y hemos superpuesto los casos 6, 8 y 9. Podemos comprobar que la respuesta del caso 8 (con el forjado bien conectado a los muros de atado) no se diferencia mucho de la del caso 6 (edificio sin lesiones).

Por otra parte, en la gráfica del caso 11, que incluye a la manzana y que se representa en la Fig 6–38, comprobamos como la respuesta dinámica del edificio no se ve afectada por la manzana. Las gráficas 9 y 11 son casi coincidentes.

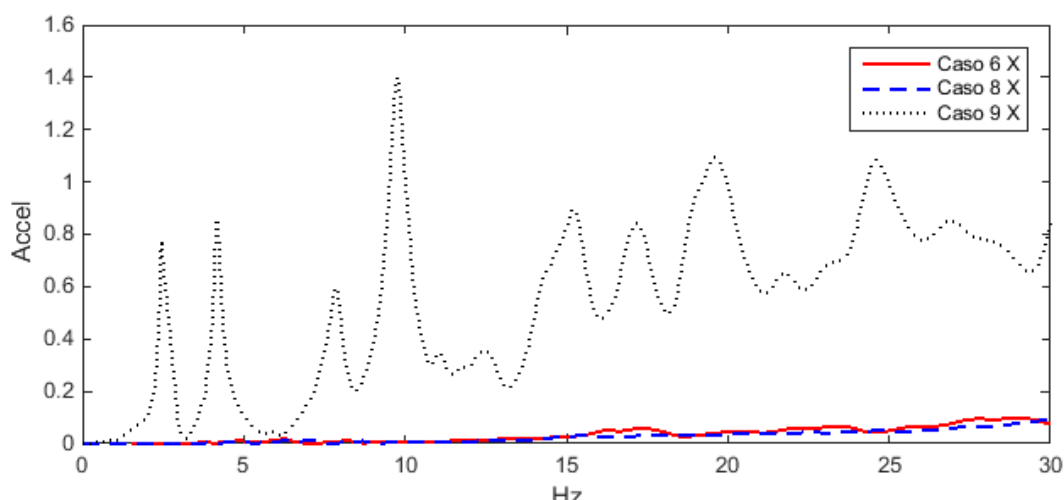


Fig 11–37: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 6 (edificio aislado, con forjado flexible Casos 8 y 9 sin lesiones) y 9 (edificio aislado, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).

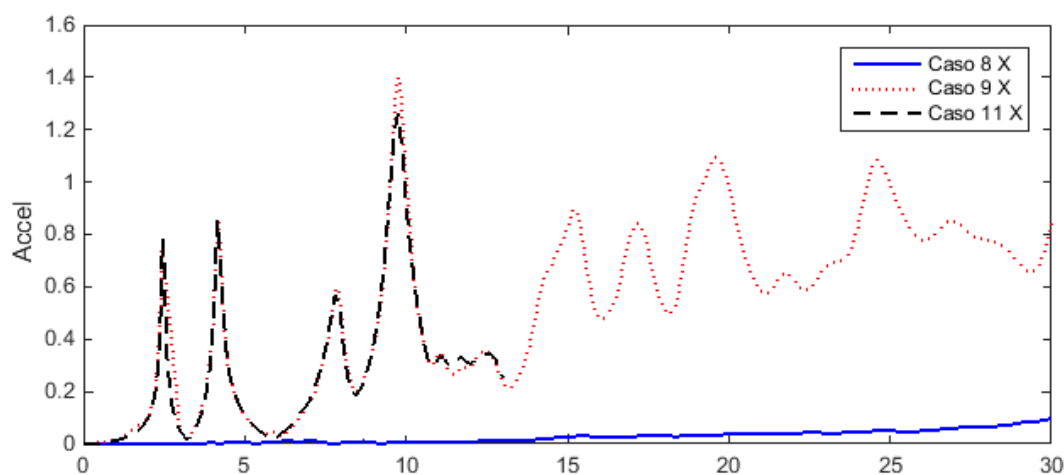


Fig 11–38: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 8 (edificio aislado, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado), 9 (edificio aislado, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado) y 11 (edificio en manzana, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).

En segundo lugar, analizaremos la Fig 6–39 correspondiente a los casos con forjado rígido (con efecto diafragma). En ella encontramos que entre el caso 1 (edificio sin lesiones) y el caso 5 (edificio con lesiones entre muros de carga y de atado y forjado desconectado de los muros de atado en primera crujía) las diferencias en la respuesta son bastante sutiles.

Hemos cambiado la escala vertical para poder distinguir la diferencia.

En la Fig 6–40 hemos superpuesto el caso 11 sobre la gráfica de la Fig 6–39, a fin de comprobar la diferencia entre el edificio con forjado rígido y flexible, cuando además el forjado presenta desconexión con el muro de atado.

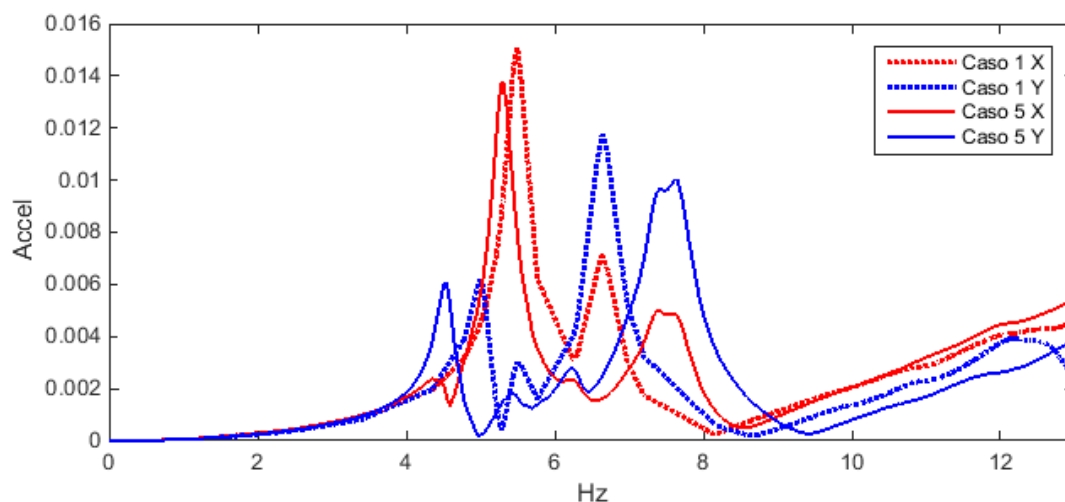


Fig 11–39: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 1 (edificio aislado, con forjado rígido y sin lesiones) y 5 (edificio aislado, con forjado rígido y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).

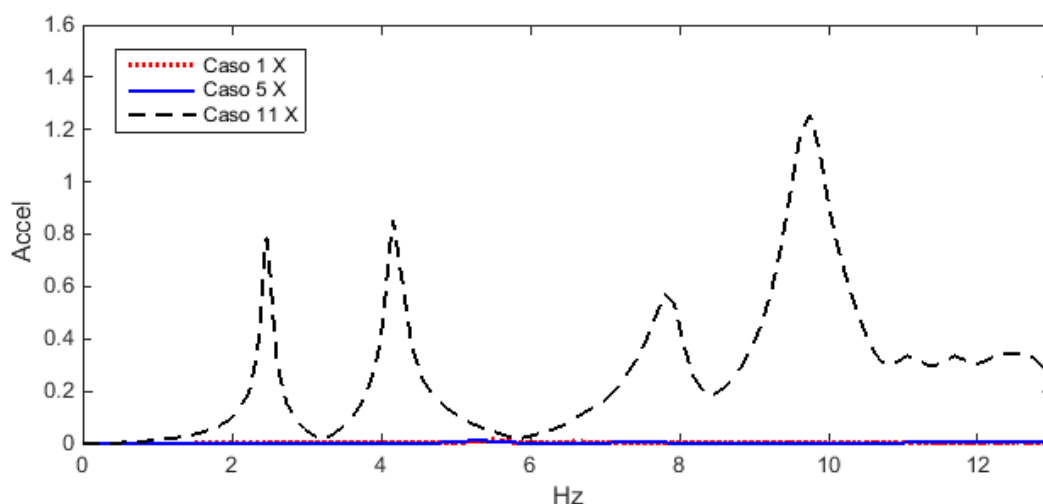


Fig 11–40: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 1 (edificio aislado, con forjado rígido y sin lesiones), 5 (edificio aislado, con forjado rígido y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado) y 11 (edificio en manzana, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).

De los resultados analizados, podemos destacar que cuando no hay desconexión entre el forjado y los muros de atado, o cuando el forjado presenta efecto diafragma, el cambio en la respuesta es demasiado débil para identificarlo mediante ensayos sencillos, como podemos deducir de las Fig 6–39 y Fig 6–40. Por tanto podemos afirmar que en en estos casos, el efecto de la manzana no será apreciable.

Sin embargo, en el caso de forjado flexible, con lesiones entre muros de carga y de atado y desconexión entre forjado y muro de atado, la respuesta dinámica en dirección perpendicular a fachada se dispara. Para este caso particular, la manzana tiene poco efecto sobre la respuesta en esa dirección, como puede apreciarse en la Fig 6–38.

6.9 Influencia de las lesiones.

En las Fig 6–41 a Fig 6–52 se representan las gráficas de los distintos tipos en su configuración con forjado flexible (F1) y con forjado rígido (F8). Se superponen en cada figura las gráficas correspondientes a la respuesta en dirección X y en dirección Y.

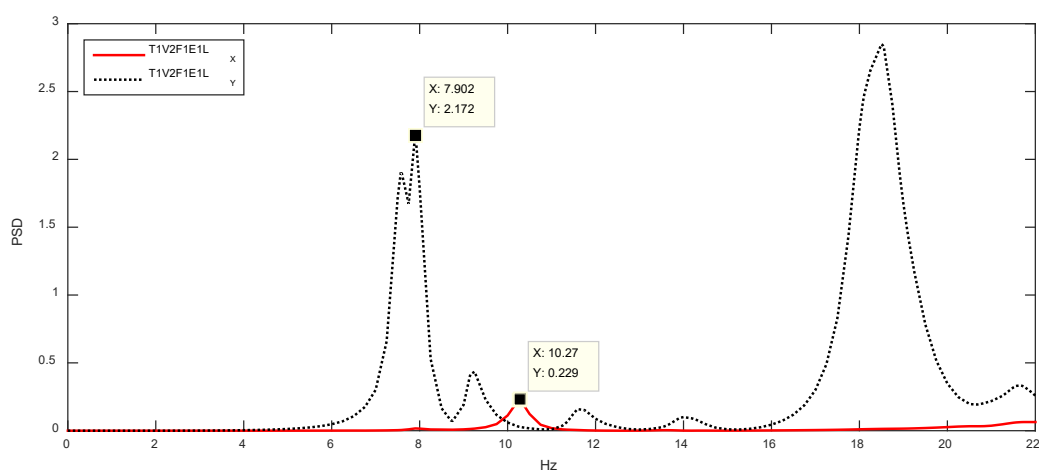


Fig 11–41: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1.

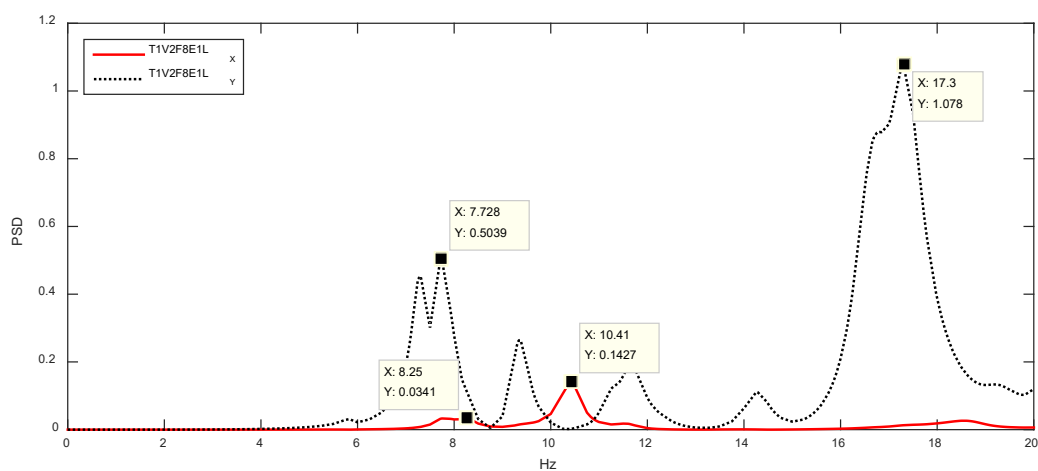


Fig 11-42: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesión tipo 1.

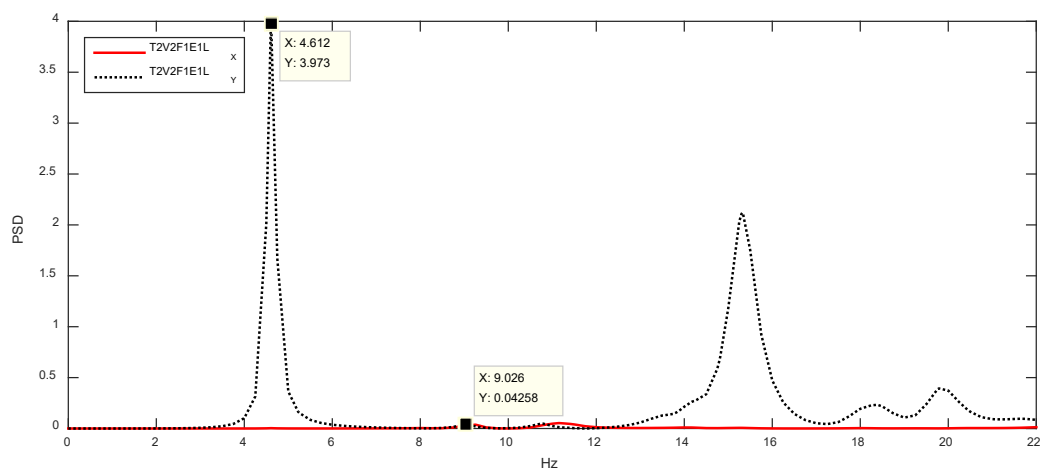


Fig 11-43: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 2, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesión tipo 1.

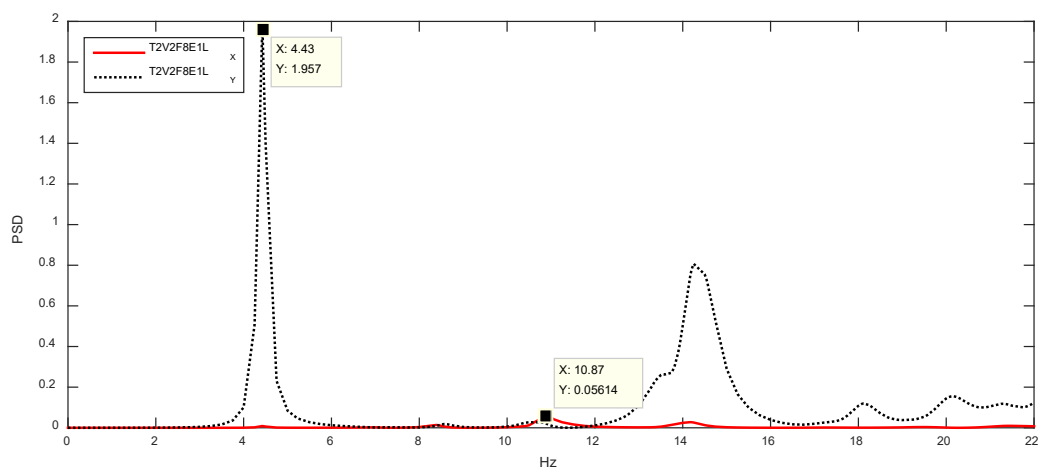


Fig 11-44: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 2, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesión tipo 1.

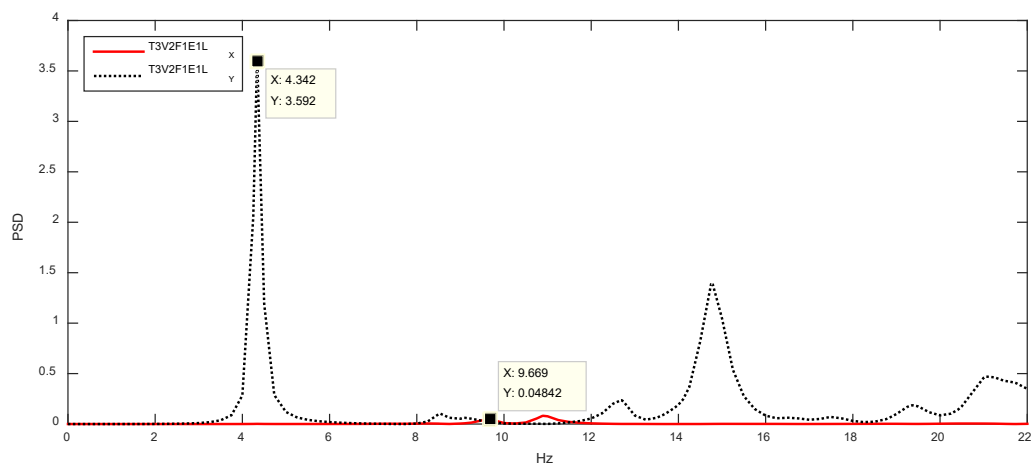


Fig 11-45: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 3, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1.

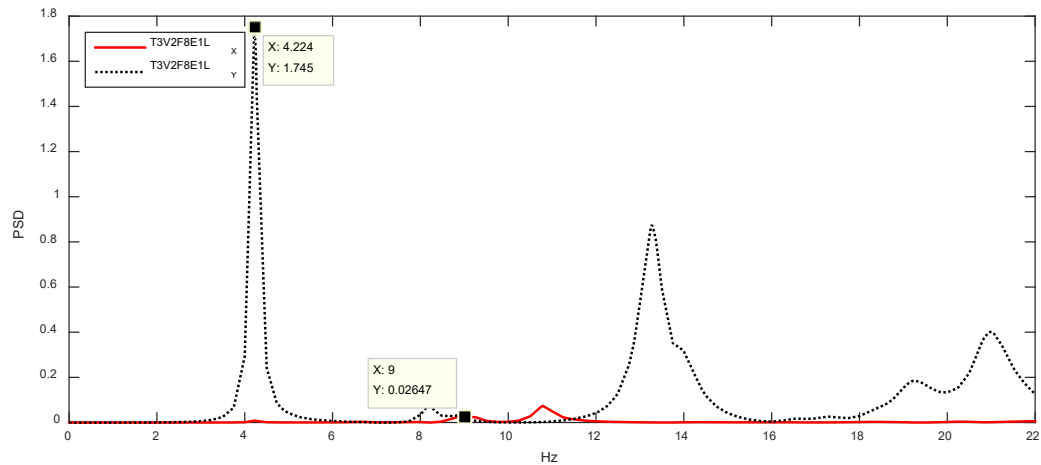


Fig 11-46: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 3, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesion tipo 1.

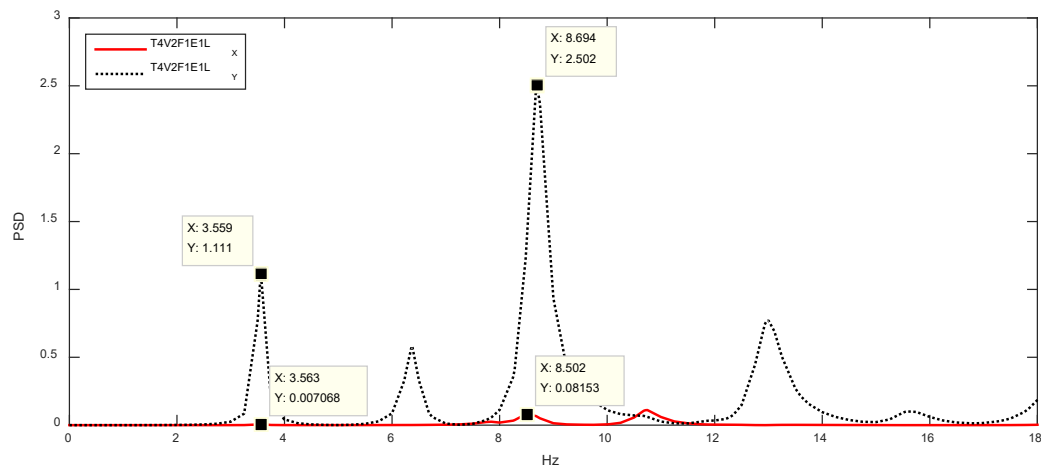


Fig 11-47: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 4, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1.

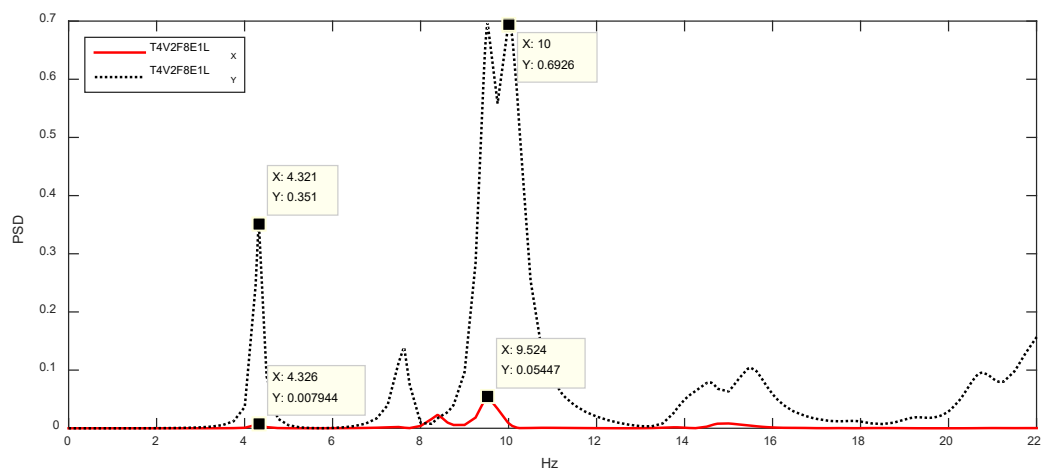


Fig 11-48: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 4, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesión tipo 1.

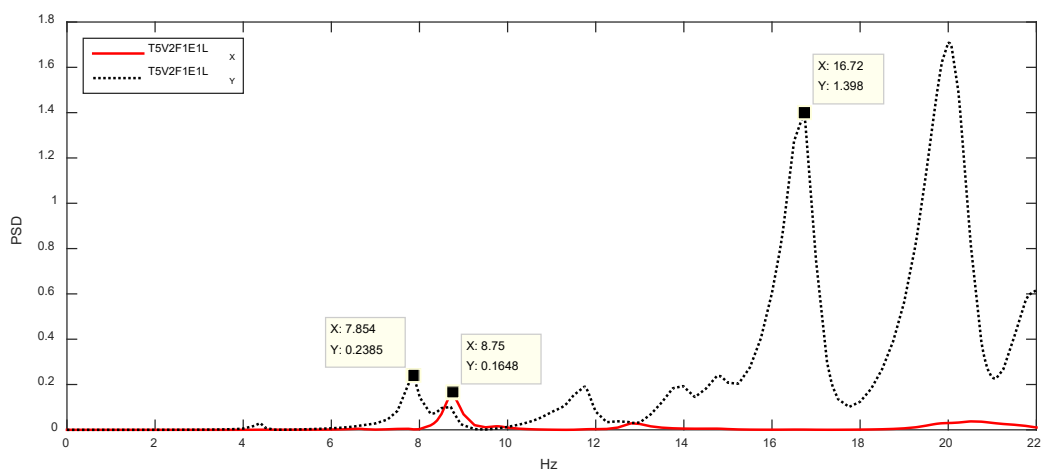


Fig 11-49: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 5, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesión tipo 1.

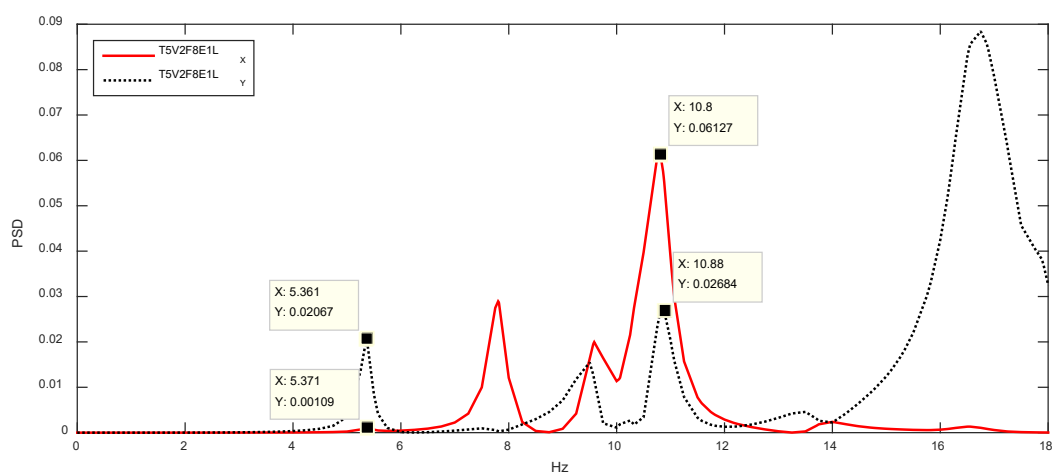


Fig 11-50: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 5, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesión tipo 1.

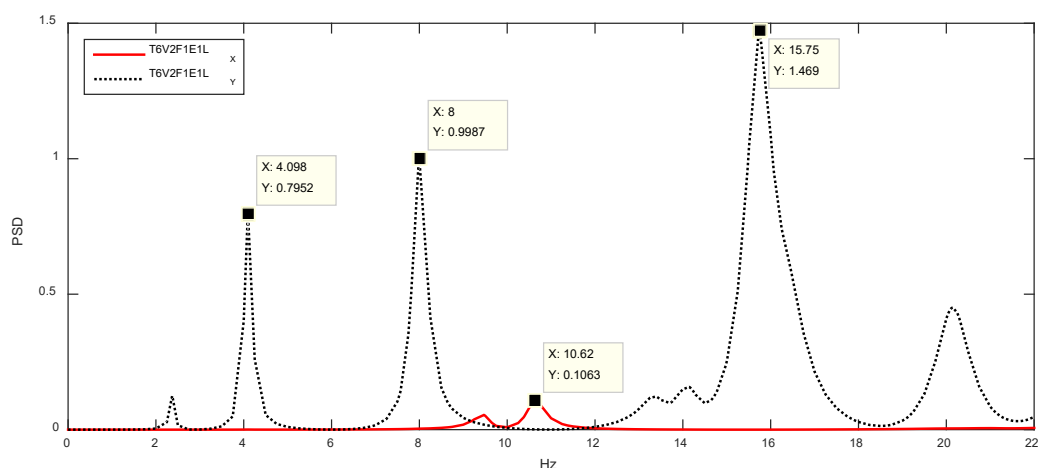


Fig 11-51: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 6, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1.

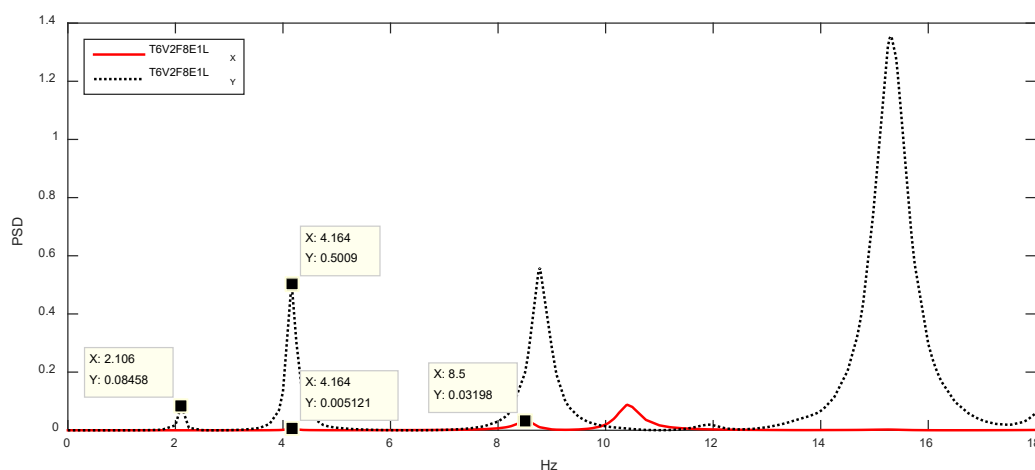


Fig 11-52: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 6, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesion tipo 1.

Tabla 11-8: Resumen de frecuencias en modelos con lesion tipo 1

	Forjado 1 (flexible)			Forjado 8 (rígido)		
	PSD X	PSD Y	Factor Y/X	PSD X	PSD Y	Factor Y/X
T1V2	0,22900	2,17200	9,48	0,03410	0,50390	14,78
T2V2	0,04258	3,97300	93,31	0,05614	1,95700	34,86
T3V2	0,04842	3,59200	74,18	0,02647	1,74500	65,92
T4V2	0,08153	2,50200	30,69	0,05447	0,69200	12,70
T5V2	0,16480	1,39800	8,48	0,00109	0,02067	18,96
T6V2	0,10630	1,46900	13,82	0,00512	0,50090	97,81

En la Tabla 6-8 podemos comprobar que los resultados de las gráficas presentan una diferencia muy clara entre las direcciones X e Y, que en los casos más significativos, como el edificio tipo 2

con forjado tipo 1 llega a presentar picos en dirección Y 93 veces más altos que en dirección X.

El caso 5 (Fig 6–49 y Fig 6–50), como se ha comentado anteriormente, es poco representativo por su configuración geométrica y constructiva, que mezcla muros y columnas.

Se puede apreciar que en los casos menos claros la proporción de valores es, aproximadamente, de 10. Este hecho es muy relevante, ya que en las figuras de los edificios sin lesiones (que se aportan en el anejo 3) comprobamos que las proporciones entre valores máximos son inferiores a 3.

Como ejemplo, en las figuras siguientes (Fig 6–53 y Fig 6–54) se representan los casos correspondientes al edificio tipo 2 con forjado flexible (F1) y rígido (F8). Puede apreciarse que los valores máximos de PSD en dirección X e Y son muy similares, con proporciones inferiores a 1.5

Si se comparan con las Fig 6–41 y Fig 6–42 (correspondientes al mismo edificio, sin lesiones) pueden apreciarse diferencias muy claras.

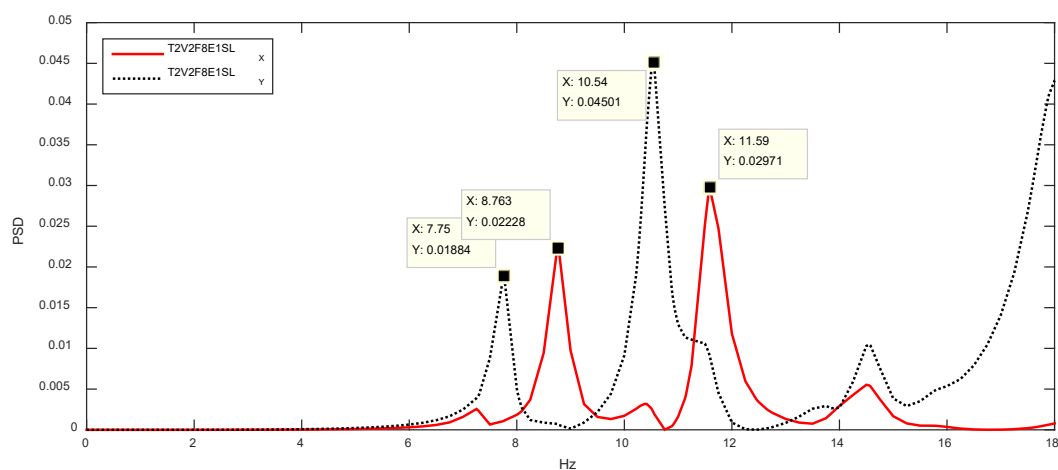


Fig 11–53: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) sin lesiones

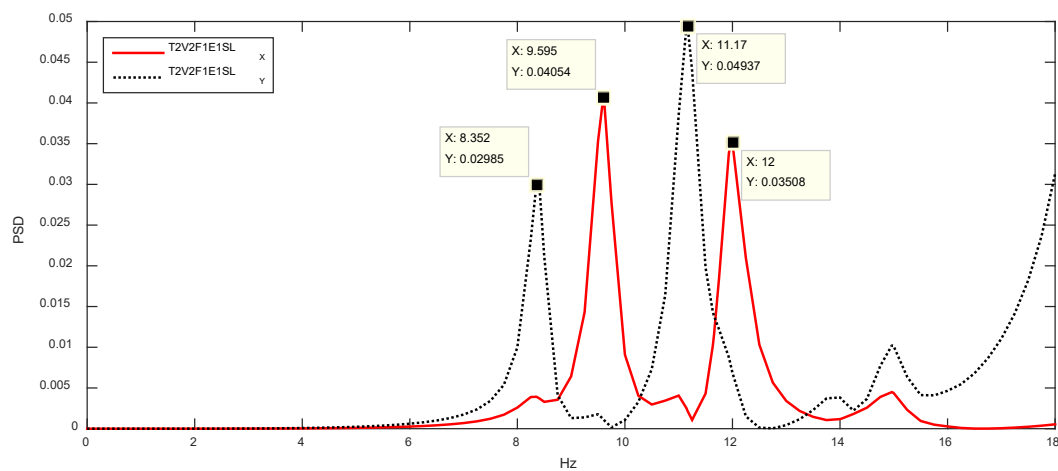


Fig 11–54: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) sin lesiones

En todos los casos analizados hasta ahora, el punto de ensayo se encuentra situado cerca de la zona lesionada.

En las figuras siguientes se puede comparar las gráficas correspondientes al modelo de edificio tipo 1, con la lesión 1 (Fig 6–55 y Fig 6–56), que está localizada junto al punto de ensayo y con la lesión 2 (fig BBB y BBB) que se sitúa al otro extremo de la fachada del edificio.

Puede comprobarse que las diferencias entre las gráficas X e Y en ambos casos son suficientemente importantes.

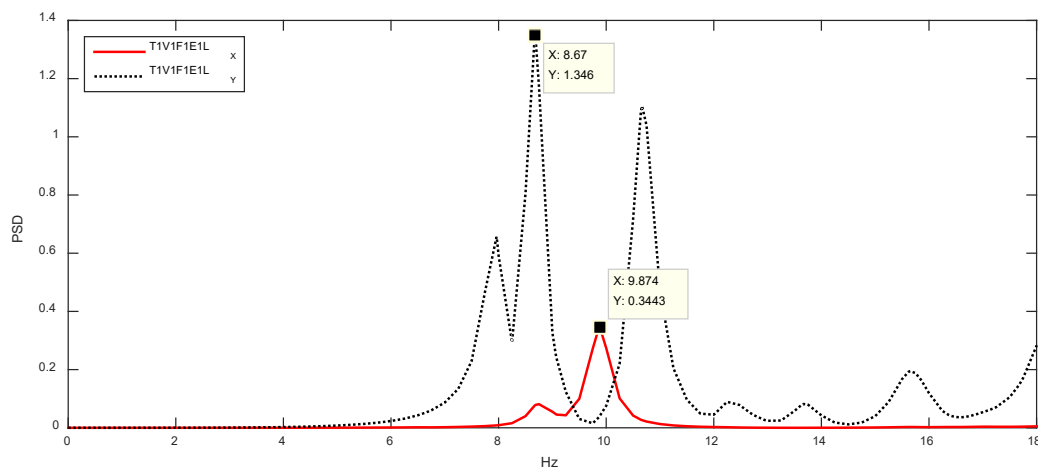


Fig 11–55: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 1, y forjado flexible (F1) con lesión tipo 1

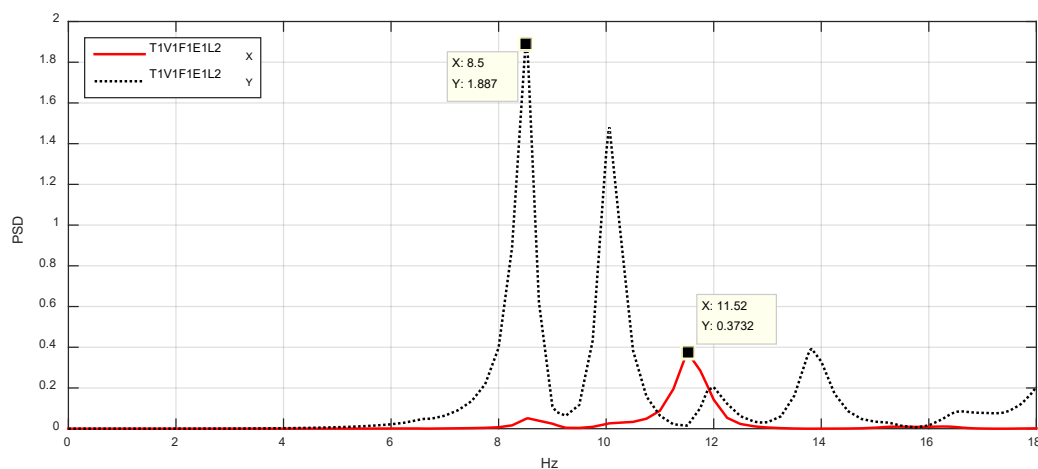


Fig 11–56: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 1, y forjado rígido (F8) con lesión tipo 1

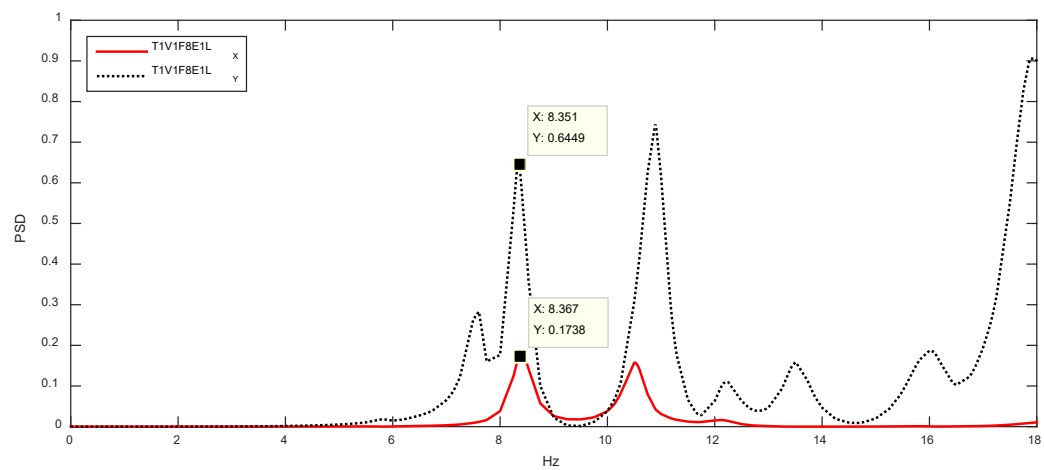


Fig 11–57: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 1, y forjado flexible (F1) con lesión tipo 2

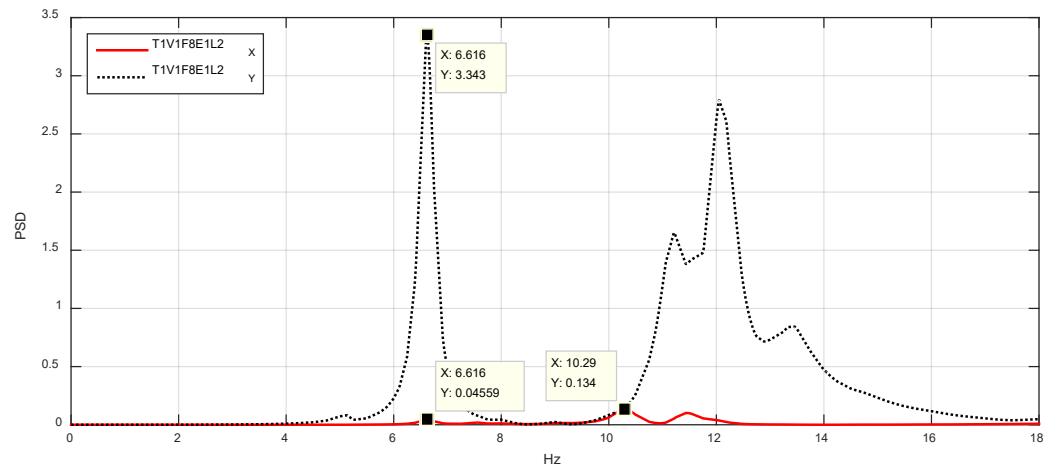


Fig 11–58: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 1, y forjado rígido (F8) con lesión tipo 2

7. Conclusiones y futuras líneas de investigación

7.1 Conclusiones

En la presente tesis se han estudiado diversa bibliografía en busca de los tipos arquitectónicos habituales en el casco histórico de Sevilla, con estructura de obra fábrica. Tras lo cual se han seleccionado y simplificado seis arquetipos (expuestos en 5.1).

Se han estudiado las características habituales de estos edificios y se ha realizado un cuadro de parámetros que se expone en 5.2.

Con estos parámetros, se han construido varios modelos de elementos finitos de cada arquetipo. Para ello ha sido muy interesante contar con la ayuda de herramientas de diseño paramétrico, como Rhino y Grasshopper.

Los modelos han sido calculado mediante el programa Sap2000 v.16, realizando en cada uno dos tipos de análisis, modal y PSD.

Atendiendo a los resultados de los análisis realizados y las particularidades del objeto de estudio de la presente tesis, se exponen a continuación las conclusiones más importantes.

La experiencia y la bibliografía consultada dice que el rango de frecuencia que pueden detectarse en este tipo de edificios, sin ayuda de medios especiales de excitación ronda los 15 Hz. Los resultados de los cálculos efectuados, y que se resumen en el punto 6.1, nos muestra que esto no debe ser un problema, ya que los modos principales, que movilizan más del 60% de la masa de los edificios se encuentran en frecuencias entre 5 y 10 Hz, y que en edificios con lesiones, pueden aparecer picos de frecuencia menores de 5 Hz.

En el punto 6.2 de esta tesis puede comprobarse como la lectura de los resultados de un único ensayo con acelerómetro, plasmados en una gráfica de frecuencia/aceleración no aporta información suficiente acerca de las formas modales del edificio. Por este motivo que, hoy en día, cuando se realizan un análisis dinámico de un puente o un monumento suelen realizarse múltiples ensayos, de forma coordinada, de forma que puedan aplicarse las técnicas de análisis descritas en 2.3.2

Pero, como se demuestra en 6.9, la lectura de resultados de un único ensayo, con transductores en dos direcciones ortogonales de un plano horizontal, puede indicar claramente la existencia de una lesión.

Si comparamos las gráficas 6-53 y 6-54 correspondientes a un modelo sin lesiones con las 6-41 y 6-42 correspondientes al mismo modelo pero con lesiones, podemos comprobar el interés de esta técnica. En el modelo sin lesiones las amplitudes de las frecuencias en las dos direcciones son de un orden de magnitud parecido, con factores de escala menores a 1.5. Por otra parte, en el modelo con lesiones las diferencias de magnitud entre las dos gráficas son mucho más im-

portantes, con un factor de proporción de 10 en ese ejemplo concreto y en muchos otros casos analizados. En los casos menos claros, el factor de escala es superior a 3.

Por tanto el método de lectura de la gráfica de frecuencia/aceleraciones, en el caso particular que estamos analizando, puede ser una herramienta de diagnóstico muy potente.

En relación a la forma de las gráficas en caso de lesiones, se puede resaltar el hecho de que en todos los casos estudiados, la gráfica que presenta mayores valores de PSD es la correspondiente a la dirección de las viguetas de la crujía lesionada.

En 6.3, 6.4 y 6.5 comprobamos que la distribución geométrica del edificio, las dimensiones en planta, o el módulo de elasticidad de los muros (siempre dentro de unos valores normales para el problema de estudio) tienen poca influencia en el problema de detección de lesiones.

El tipo de forjado tampoco es un factor determinante, si este es flexible en su plano. Tal como se justifica en 6.6. Sin embargo, en 6.6 se expone como los resultados cambian de manera drástica cuando el forjado presenta efecto diafragma. En este caso es difícil detectar las lesiones mediante el método expuesto.

Con respecto a los forjados flexible, es necesario aclarar que si bien los datos de la rigidez transversal de forjados con tablazón de madera, en su plano, han sido obtenidos de ensayos en modelos reales a escala 1/1 (tal como se expone en 4.1.4); para los forjados con revoltón o con bovedilla se ha estimado un coeficiente de corrección de la rigidez transversal de 0,01, que se supone cercano al real y se ha realizado un análisis de sensibilidad. Sería una importante aportación y una futura línea de investigación el aclarar estos datos, ya que no se ha encontrado ningún estudio sobre el tema.

La mayor parte de los cálculos se han realizado (como es habitual) sobre modelos de edificio aislado. Además se han realizado algunos modelos incluyendo toda la manzana, para comprobar la influencia de los edificios colindantes sobre los resultados del que es objeto de estudio.

En 6.8 se exponen los resultados del análisis de esta influencia y podemos destacar como en el caso de edificio con forjado flexible, con lesiones entre muros de carga y de atado y desconexión entre forjado y muro de atado, la respuesta dinámica en dirección perpendicular a fachada se dispara. Por tanto en caso de que existan lesiones cerca de fachada, es probable que puedan ser captadas mediante ensayos dinámicos simples, aunque existan edificios colindantes. Para ello es interesante situar los puntos de ensayo cerca de la fachada.

7.2 Futuras líneas de investigación

Como se ha expuesto en el punto anterior, no se ha encontrado documentación acerca del parámetro de rigidez transversal del forjado en su plano, para forjados con aligeramiento mediante revoltón cerámico o mediante bovedillas, sin capa de compresión. Por tanto, este es un tema que

puede ser motivo de desarrollo futuro. Sobre todo teniendo en cuenta que es un tipo de forjado muy usado hasta la primera mitad del siglo XX.

En todos los modelos con lesiones, estas se han localizado cerca de la fachada. Sería interesante comprobar cómo afectan a la respuesta dinámica otras localizaciones, tanto en modelos numéricos como en ensayos reales.

Como se expuso en el capítulo introductorio, la tesis es un primer paso en el proceso de desarrollo de un protocolo de ensayos, en el que se han obtenido mediante elementos finitos los resultados PSD de modelos sin y con lesiones.

A continuación es necesario realizar ensayos de corroboración mediante acelerómetro en edificios reales y comprobar que los resultados de los trabajos teóricos se repiten en los reales. Si esto ocurre, podría suponer un gran avance para la inspección y análisis de este tipo de edificios.

A fin de que esta técnica pueda tener una rápida difusión, será muy interesante la redacción de un protocolo de ensayo para la detección de lesiones en estas estructuras, que sería de aplicación en diversos campos:

- Nueva herramienta para laboratorios y técnicos especialistas en peritación y rehabilitación. Una técnica que permitiría identificar discontinuidades estructurales ocultas a la vista del inspector. Ensayos aplicables a edificios en uso. Protocolo de fácil implementación a la ITE. (Impacto económico)
- Mantenimiento y seguridad de las viviendas. Detección temprana de patologías estructurales para garantizar la integridad del edificio y la seguridad de sus inquilinos. (Impacto social)
- Conservación del patrimonio. Los edificios de estructura de fábrica son parte esencial del patrimonio español. Su mantenimiento y conservación debe ser un objetivo prioritario. (Impacto económico-social)
- Evitar posibles demoliciones y levantamiento de nuevas construcciones. La aplicación del método propuesto permitirá iniciar las tareas de rehabilitación a tiempo. Ahorro económico y energético. (Impacto económico-ambiental)

Para los ensayos con acelerómetro, la oferta de equipamiento existente es muy amplia y con diversa y muy distintas características. Será importante definir en el mencionado protocolo cuál debe ser la configuración mínima necesaria del equipo de ensayo.

En la presente tesis se ha estudiado un tipo de lesión muy común en el casco histórico de Sevilla. Sería interesante comprobar cómo afectan otro tipo de lesiones a la respuesta dinámica del edificio.

Y por último será importante estudiar que zonas geográficas presentan tipos arquitectónicos similares y la misma sintomatología. En dichas zonas las conclusiones de estos trabajos serían de aplicación directa.

Lista de Tablas

Tabla 1–1: Edificios visitados en Sevilla con estructura de obra de fábrica	3
Tabla 2–2: Fórmula del periodo fundamental aproximado, para edificios con estructura de fábrica de ladrillo, según distintas normas internacionales.	29
Tabla 2–3: Resultados para un edificio de dos planta de altura, con dimensión en planta de 13*14 m y muros de carga y de atado de 60 cm y de 29 cm de espesor respectivamente (equivalente al Tipo 1, variante 2).	30
Tabla 4–1: Resultados para un edificio de dos planta de altura, con dimensión en planta de 13*14 m y muros de carga y de atado de 60 cm y de 29 cm de espesor respectivamente (equivalente al Tipo 1, variante 2).	81
Tabla 4–2: Tabla comparativa entre los resultados de ensayo en probetas de fábrica de ladrillo y las predicciones analíticas.	83
Tabla 4–3: Tabla de <i>valores orientativos del parámetro α</i>	84
Tabla 4–4: Tabla de <i>valores orientativos del módulo de elasticidad del ladrillo E_b [N/mm²]</i>	85
Tabla 4–6: FEMA 356. Tabla rigidez esperada en el plano (efecto diafragma) para distintos tipos de forjados de madera.	88
Tabla 4–5: Descripción de los casos analizados	97
Tabla 6–1: Resumen de los resultados modales de los seis tipos de edificios, en su configuración 2 (dimensiones medias) y con los forjados tipo 1 (viguetas de madera y tablazón de madera) y 6 (viguetas de acero y revoltón cerámico), con el edificio <u>sin lesiones</u>	119
Tabla 6–2: Resumen de los resultados modales de los seis tipos de edificios, en su configuración 2 (dimensiones medias) y con los forjados tipo 1 (viguetas de madera y tablazón de madera) y 6 (viguetas de acero y revoltón cerámico), con el edificio <u>con lesiones</u>	120
Tabla 6–3: Caso T1V1F1E1SL. Resultados análisis modal.. . . .	121
Tabla 6–4: Resumen de frecuencias de las figuras Fig 6–9 a Fig 6–14	129
Tabla 6–5: Resumen de frecuencias de las figuras Fig 6–9 a Fig 6–14 según tipo de forjado.	129
Tabla 6–6: Resumen de frecuencias en modelos con diferente módulo de elasticidad	133
Tabla 6–7: Resumen de frecuencias en modelos con diferente tipo de forjado	137
Tabla 6–8: Resumen de frecuencias en modelos con lesion tipo 1	147

Lista de Figuras

Fig 1–1: Desplazamiento entre zócalos de azulejo	6
Fig 1–2: Desplazamiento entre zócalos de azulejo	6
Fig 1–3: Desplazamiento entre zócalos de azulejo y fisura en muros de planta baja	6
Fig 1–4: Inestabilidad del edificio por desconexión entre muros de carga y de atado.	7
Fig 1–5: Gráfica FFT del ensayo dinámico efectuado en edificio en C/ Reyes Católicos. Sevilla. .8	
Fig 1–6: Gráfica PSD de modelo de elementos finitos correspondient al edificio en C/ Reyes Católicos.	8
Fig 1–7: Derrumbe en Riudoms en 2009. imagen EFE	9
Fig 1–8: Derrumbe en Mataró en 2010. imagen El Mundo	9
Fig 1–9: Derrumbe en Lérida en 2012. imagen ABC	9
Fig 1–10: Derrumbe en Vigo en 2011. imagen La voz de Galicia	10
Fig 1–11: Derrumbe en Laredo en 2013. imagen Diario Montañez	10
Fig 1–12: Derrumbe en Madrid en 2015. imagen ABC	10
Fig 1–13: Desplome de la fachada de un edificio durante el terremoto de Lorca.	11
Fig 1–14: Desplome de cubiertas y forjados durante el terremoto de Lorca.	11
Fig 1–15: Proceso de renovación de la edificación del casco histórico de Sevilla.	12
Fig 1–16: Lesiones en muro de edificio en L'Aquila, tras el sismo de 2009	13
Fig 1–17: Edificio en L'Aquila, tras el sismo de 2009. Puede comprobarse que existen refuerzos metálicos en los muros y que no el temblor no ha provocado lesiones apreciables...	13
Fig 3–1: Esquema típico de un ensayo dinámico.. . . .	22
Fig 3–2: Martillo para ensayo dinámico.. . . .	22
Fig 3–3: Excitador dinámico	22
Fig 3–4: Acelerómetros montado bajo un puente	23
Fig 3–5: Conjunto de acelerómetros montado bajo un puente.. . . .	24
Fig 3–6: Acelerómetro montado bajo un puente	24
Fig 3–7: Acondicionador de señal.	25
Fig 3–8: Módulos de conversión analógico-digital (DAQ)	25
Fig 3–9: Excitadores servo-hidráulico usados en las pruebas de vibración forzada en el Tatara Bridge.. . . .	26

Fig 5–1: Evolución histórica de Sevilla	45
Fig 5–2: Planta de edificio en C/ <i>Conde de Ibarra 18</i>	48
Fig 5–3: Tres ejemplos de casa patio: de cuatro galerías, de patio central con dos galerías y de patio adosado a la medianera.. . . .	49
Fig 5–4: Representación gráfica de disposiciones de las crujías alrededor del patio.	50
Fig 5–5: Representación gráfica de algunos tipos de retículas resistentes	51
Fig 5–6: Cimiento de edificio en C/ Rodríguez Marín.	53
Fig 5–7: Tipos de cimientos.	54
Fig 5–8: Cata junto a muro.. . . .	54
Fig 5–9: Sobreanchos en la cimentación de un muro en C/ Jesús de Gran Poder, 93.. . . .	55
Fig 5–10: Muro con relleno interior de tapial	56
Fig 5–11: Tipos de aparejos.	57
Fig 5–12: Tipos de forjados tradicionales en Sevilla	58
Fig 5–13: Forjado de rollizos	59
Fig 5–14: Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de madera simple.	59
Fig 5–15: Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de madera simple.	59
Fig 5–16: Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de madera simple.	60
Fig 5–17: Forjado de viguetas de madera aserrada y tablero de madera simple.	60
Fig 5–18: Forjado de viguetas de madera en galería de distribución de patio en edificio C/ Parras.	61
Fig 5–19: Forjado de viguetas de madera aserrada, con viguetillas de formación del casetonado y tablero de rasilla.. . . .	62
Fig 5–20: Forjado de viguetas de madera aserrada, con viguetillas de formación del casetonado y tablero de rasilla en C/ Teodosio.. . . .	62
Fig 5–21: Forjado de viguetas de madera aserrada, con revoltón.	63
Fig 5–22: Forjado de viguetas de madera aserrada, con revoltón.	63
Fig 5–23: Encuentro del forjado con el muro de través.	64
Fig 5–24: Encuentro del forjado con el muro de carga.	64
Fig 5–25: Encuentro del forjado con el muro de carga.	64
Fig 5–26: Forjado cerámico.	65
Fig 5–27: Forjado cerámico.	65

Fig 5–28: Forjado ejecutado mediante losa de hormigón armado.	65
Fig 5–29: Forjado ejecutado mediante losa de hormigón armado.	65
Fig 5–30: Formación de dintel plano de ladrillo.	66
Fig 5–31: Tipología edificatoria.	67
Fig 5–32: Grietas inclinadas en edificio en C/ Relator cuya causa probable es la excavación de un sótano en el edificio colindante.	68
Fig 5–33: Desplome de muro medianero en C/ Lumbreras.	69
Fig 5–34: Grieta en unión entre muro de carga y muro de atado en edificio en C/ Almirante Hoyos	69
Fig 5–35: Habitación de edificio en C/ Dos de Mayo.. . . .	70
Fig 5–36: Habitación de edificio en C/ Dos de Mayo.. . . .	71
Fig 5–37: Habitación de edificio en C/ Dos de Mayo.. . . .	71
Fig 5–38: Lesión en forjado.	72
Fig 5–39: Lesión en forjado.	72
Fig 5–40: Viguetas reparadas mediante prótesis metálicas.	73
Fig 5–41: Corrosión de vigueta metálica.	73
Fig 5–42: Lesión en muro sobre dintel de hueco de paso.	74
Fig 7–1: Abades 30	78
Fig 7–2: Alfarería 15	78
Fig 7–3: Alameda de Hércules 93	79
Fig 7–4: Alameda de Hércules 97	79
Fig 7–5: Archeros 1	80
Fig 7–6: Bustos Tavera 41	80
Fig 7–7: Calatrava 30	81
Fig 7–8: Cenicero 2	81
Fig 7–9: Churruca 1	82
Fig 7–10: Corral del Rey 4.	82
Fig 7–11: Cristo del Buen Viaje 16	82
Fig 7–12: Doña María Coronel 15	83
Fig 7–13: Doncellas 8	83

Fig 7-14: Doncellas 23	84
Fig 7-15: Enladrillada 42	84
Fig 7-16: Gano 2.	85
Fig 7-17: Gano 4.	85
Fig 7-18: General Castaño	86
Fig 7-19: Matahacas 14.	86
Fig 7-20: Plaza de San Marcos 13	86
Fig 7-21: Sagasta 1	87
Fig 7-22: San Roque.	87
Fig 7-23: Tipos estructurales analizados	88
Fig 7-24: Efecto desestabilizador del diafragma elástico del forjado en el muro	94
Fig 7-25: Mecanismos de fallo de edificios en una manzana	95
Fig 7-26: Efecto desestabilizador del diafragma elástico del forjado en el muro en caso de rotura de la unión muro de carga-muro de atado	96
Fig 7-27: Esquema de contribución de los conectores y de la rigidez de diafragma a la rigidez del conjunto.	97
Fig 7-28: Modelo matemático de la rigidez de diafragma	98
Fig 7-29: Esquema de la manzana estudiada, con indicación de la situación del edificio selec- cionado.	100
Fig 7-30: Plata esquemática del edificio estudiado.	102
Fig 7-31: Volumetría del modelo de elementos finitos del edificio aislado.	102
Fig 7-32: Volumetría del modelo de elementos finitos de la manzana.	103
Fig 7-33: Forjado con viguetas y tablazón de madera.	103
Fig 7-34: Esquema del edificio con indicación de las lesiones que se han introducido.	104
Fig 7-35: Medición realizada en edificio en C/ Reyes Católicos	108
Fig 7-36: Esquema de lesiones analizadas.	109
Fig 9-1: Esquema de edificio tipo 1	115
Fig 9-2: Esquema de edificio tipo 2	116
Fig 9-3: Esquema de edificio tipo 3	116
Fig 9-4: Esquema de edificio tipo 4	117
Fig 9-5: Esquema de edificio tipo 5	117

Fig 9–6: Esquema de edificio tipo 6	118
Fig 9–7: Detalle del código general.	119
Fig 9–8: Detalle del cluster 1, que se encarga de generar el modelo 3D del edificio tipo 1 . .	120
Fig 9–9: Detalle del cluster 2, que genera la definición de nudos y elementos shell en Sap2000.	121
Fig 9–10: Detalle del cluster 12, que realiza el mallado y genera los nudos y caras del modelo.	121
Fig 11–1: Gráfica PSD correspondiente a la dirección Y del modelo de edificio tipo 1, variante dimensional 1 con tipo de forjado 1, modulo de elasticidad bajo para los muros (700 MPa), sin lesiones.	134
Fig 11–2: Gráfica de desplazamientos modales correspondientes al modo 2 del modelo T1V1F1E1SL	134
Fig 11–3: Gráfica de desplazamientos modales correspondientes al modo 4 del modelo T1V1F1E1SL	135
Fig 11–4: Gráfica de desplazamientos modales correspondientes al modo 6 del modelo T1V1F1E1SL	135
Fig 11–5: Gráfica de resultados de densidad espectral de potencia (PSD) correspondientes a los modleos con forjado mas deformable (F1) en la dirección X	136
Fig 11–6: Gráfica PSD correspondientes a los modleos con forjado mas deformable (F1) en la dirección Y.	137
Fig 11–7: Gráfica PSD correspondientes a los modleos con forjado mas rígido (F8) en la dirección X	137
Fig 11–8: Gráfica PSD correspondientes a los modleos con forjado mas rígido (F8) en la dirección Y	137
Fig 11–9: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 1 con forjado mas flexible (F1) en la dirección X.	138
Fig 11–10: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 1 con forjado mas rígido (F8) en la dirección X	139
Fig 11–11: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 2 con forjado mas flexible (F1) en la dirección X.	139
Fig 11–12: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 2 con forjado mas rígido (F8) en la dirección X	139
Fig 11–13: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 2 con forjado mas flexible (F1) en la dirección X.	140
Fig 11–14: Gráfica PSD correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo de edificio tipo 2 con forjado mas rígido (F8) en la dirección X	140

Fig 11–15: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado flexible (F1) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección X	142
Fig 11–16: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado flexible (F1) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección Y	142
Fig 11–17: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado rígido (F8) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección X	143
Fig 11–18: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado rígido (F8) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección Y	143
Fig 11–19: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado flexible (F1) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección X	143
Fig 11–20: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 3 con forjado flexible (F1) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección Y	144
Fig 11–21: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 6 con forjado rígido (F8) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección X	144
Fig 11–22: Gráfica PSD correspondientes al modelo tipo 6 con forjado rígido (F8) y módulo de elasticidad bajo (E1) y medio (E2), en la dirección Y	144
Fig 11–23: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X	146
Fig 11–24: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 2, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X	147
Fig 11–25: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 3, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X	147
Fig 11–26: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 4, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X	147
Fig 11–27: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 5, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X	148
Fig 11–28: Gráficas PSD correspondientes al modelo tipo 6, variante dimensional 2, sin lesiones y con distintos tipos de forjado, en la dirección X	148
Fig 11–29: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)	149
Fig 11–30: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 2, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)	150
Fig 11–31: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 3, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)	150

Fig 11–32: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 4, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)	150
Fig 11–33: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 5, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)	151
Fig 11–34: Gráficas PSD en la dirección X correspondientes al modelo tipo 6, variante dimensional 2, sin lesiones y con forjado tipo 9 vigueta de hormigón y bovedilla (F9) y al mismo caso con capa de compresión de hormigón (FD)	151
Fig 11–35: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 6 (edificio aislado con forjado flexible y sin lesiones) y 9 (edificio aislado, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).	152
Fig 11–36: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 7 (edificio en manzana, con forjado flexible y sin lesiones) y 11 (edificio en manzana, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).	152
Fig 11–37: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 6 (edificio aislado, con forjado flexible Casos 8 y 9 sin lesiones) y 9 (edificio aislado, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado)..	153
Fig 11–38: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 8 (edificio aislado, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado), 9 (edificio aislado, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado) y 11(edificio en manzana, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado)..	153
Fig 11–39: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 1 (edificio aislado, con forjado rígido y sin lesiones) y 5 (edificio aislado, con forjado rígido y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).	154
Fig 11–40: Gráficas de respuesta dinámica para el punto estudiado. Casos 1 (edificio aislado, con forjado rígido y sin lesiones), 5 (edificio aislado, con forjado rígido y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado) y 11(edificio en manzana, con forjado flexible y lesiones entre muros de carga y de atado y entre muros de atado y forjado).	154
Fig 11–41: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1.	155
Fig 11–42: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesion tipo 1.. . . .	156
Fig 11–43: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 2, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1.	156

Fig 11–44: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 2, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesion tipo 1..	156
Fig 11–45: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 3, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1..	157
Fig 11–46: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 3, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesion tipo 1..	157
Fig 11–47: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 4, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1..	157
Fig 11–48: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 4, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesion tipo 1..	158
Fig 11–49: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 5, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1..	158
Fig 11–50: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 5, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesion tipo 1..	158
Fig 11–51: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 6, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) con lesion tipo 1..	159
Fig 11–52: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 6, variante dimensional 2, y forjado rígido (F8) con lesion tipo 1..	159
Fig 11–53: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) sin lesiones	160
Fig 11–54: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 2, y forjado flexible (F1) sin lesiones	160
Fig 11–55: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 1, y forjado flexible (F1) con lesión tipo 1	161
Fig 11–56: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 1, y forjado rígido (F8) con lesión tipo 1	161
Fig 11–57: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 1, y forjado flexible (F1) con lesión tipo 2	162
Fig 11–58: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes al modelo tipo 1, variante dimensional 1, y forjado rígido (F8) con lesión tipo 2	162
Fig 25–1: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1	241
Fig 25–2: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F1 y sin lesiones.	241
Fig 25–3: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1	241

Fig 25–4: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F2 y sin lesiones.	241
Fig 25–5: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1	242
Fig 25–6: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F3 y sin lesiones.	242
Fig 25–7: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1	242
Fig 25–8: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F4 y sin lesiones.	242
Fig 25–9: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1	243
Fig 25–10: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F5 y sin lesiones	243
Fig 25–11: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1	243
Fig 25–12: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F6 y sin lesiones	243
Fig 25–13: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1	244
Fig 25–14: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F7 y sin lesiones	244
Fig 25–15: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1	244
Fig 25–16: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F8 y sin lesiones	244
Fig 25–17: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1	245
Fig 25–18: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F9 y sin lesiones	245
Fig 25–19: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1	245
Fig 25–20: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F1 y sin lesiones	245
Fig 25–21: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1	246

Fig 25–22: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F2 y sin lesiones	246
Fig 25–23: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1	246
Fig 25–24: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F3 y sin lesiones	246
Fig 25–25: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1	247
Fig 25–26: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F4 y sin lesiones	247
Fig 25–27: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1	247
Fig 25–28: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F5 y sin lesiones	247
Fig 25–29: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1	248
Fig 25–30: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F6 y sin lesiones	248
Fig 25–31: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1	248
Fig 25–32: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F7 y sin lesiones	248
Fig 25–33: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1	249
Fig 25–34: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F8 y sin lesiones	249
Fig 25–35: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1	249
Fig 25–36: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F9 y sin lesiones	249
Fig 25–37: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1	250
Fig 25–38: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F1 y sin lesiones	250
Fig 25–39: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1	250

Fig 25–40: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F2 y sin lesiones	250
Fig 25–41: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1	251
Fig 25–42: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F3 y sin lesiones	251
Fig 25–43: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1	251
Fig 25–44: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F4 y sin lesiones	251
Fig 25–45: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1	252
Fig 25–46: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F5 y sin lesiones	252
Fig 25–47: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1	252
Fig 25–48: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F6 y sin lesiones	252
Fig 25–49: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1	253
Fig 25–50: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F7 y sin lesiones	253
Fig 25–51: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1	253
Fig 25–52: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F8 y sin lesiones	253
Fig 25–53: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1	254
Fig 25–54: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F9 y sin lesiones	254
Fig 25–55: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1	254
Fig 25–56: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F1 y sin lesiones	254
Fig 25–57: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1	255

Fig 25–58: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F2 y sin lesiones	255
Fig 25–59: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1	255
Fig 25–60: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F3 y sin lesiones	255
Fig 25–61: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1	256
Fig 25–62: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F4 y sin lesiones	256
Fig 25–63: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1	256
Fig 25–64: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F5 y sin lesiones	256
Fig 25–65: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1	257
Fig 25–66: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F6 y sin lesiones	257
Fig 25–67: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1	257
Fig 25–68: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F7 y sin lesiones	257
Fig 25–69: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1	258
Fig 25–70: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F8 y sin lesiones	258
Fig 25–71: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1	258
Fig 25–72: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F9 y sin lesiones	258
Fig 25–73: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1	259
Fig 25–74: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F1 y sin lesiones	259
Fig 25–75: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1	259

Fig 25–76: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F2 y sin lesiones	259
Fig 25–77: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1	260
Fig 25–78: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F3 y sin lesiones	260
Fig 25–79: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1	260
Fig 25–80: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F4 y sin lesiones	260
Fig 25–81: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1	261
Fig 25–82: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F5 y sin lesiones	261
Fig 25–83: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1	261
Fig 25–84: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F6 y sin lesiones	261
Fig 25–85: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1	262
Fig 25–86: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F7 y sin lesiones	262
Fig 25–87: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1	262
Fig 25–88: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F8 y sin lesiones	262
Fig 25–89: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1	263
Fig 25–90: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F9 y sin lesiones	263
Fig 25–91: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1	263
Fig 25–92: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F1 y sin lesiones	263
Fig 25–93: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1	264

Fig 25–94: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F2 y sin lesiones	264
Fig 25–95: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1	264
Fig 25–96: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F3 y sin lesiones	264
Fig 25–97: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1	265
Fig 25–98: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F4 y sin lesiones	265
Fig 25–99: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1	265
Fig 25–100: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F5 y sin lesiones	265
Fig 25–101: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1	266
Fig 25–102: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F6 y sin lesiones	266
Fig 25–103: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1	266
Fig 25–104: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F7 y sin lesiones	266
Fig 25–105: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1	267
Fig 25–106: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F8 y sin lesiones	267
Fig 25–107: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1	267
Fig 25–108: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F9 y sin lesiones	267

REFERENCIAS

- Applied Technology Council. ATC 3-06. NBS special publication 510. Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings (1978). Washington D.C.: United States. Government Printing Office. Retrieved from <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc171053/>
- ASCE (American Society of Civil Engineers). (1978). ASCE/SEI 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- ASCE (American Society of Civil Engineers). (2007). ASCE/SEI 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.
- Barrett, A. R. (2006, October 6). Dynamic Testing of In-Situ Composite Floors and Evaluation of Vibration Serviceability Using the Finite Element Method (unpublished PhD. thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University. Retrieved from <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-09062006-184827/>
- Barrios Padura, Á. (2001). Estudio de las Cimentaciones de Edificios Históricos en la Provincia de Sevilla. Siglo XII al XVI. Universidad de Sevilla. Retrieved from <http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/1902/estudio-de-las-cimentaciones-de-edificios-historicos-en-la-provincia-de-sevilla-siglo-xii-al-xvi/>
- Begg, R. ., Mackenzie, A. ., Dodds, C. ., & Loland, O. (1976). Structural integrity monitoring using digital processing of vibration signals. In 8th Annual Offshore Technology Conference (pp. 305–311). Houston, TX.
- Binda, L., & Saisi, A. (2005). Research on historic structures in seismic areas in Italy. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), 71–85. doi:10.1002/pse.194
- Binda, L., & Saisi, A. (2009). Knowledge of the building, on site investigation and connected problems. In E. Cosenza (Ed.), *Eurocode 8 perspectives from the Italian Standpoint Workshop* (pp. 213–224). Napoli, Italy. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/228407565_KNOWLEDGE_OF_THE_BUILDING_ON_SITE_INVESTIGATION_AND_CONNECTED_PROBLEMS/file/d912f5082a1ec95138.pdf
- Brignola, A., Pampanin, S., & Podestà, S. (2009). Evaluation and control of the in-plane stiffness of Timber floor for the performance-based retrofit of URM buildings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 42(3), 204–221.
- Brignola, A., Pampanin, S., & Podestà, S. (2012). Experimental Evaluation of the In-Plane Stiffness

- of Timber Diaphragms. *Earthquake Spectra*, 28(4), 1687–1709. doi:10.1193/1.4000088
- Brincker, R., & Kirkegaard, P. H. (2010). Special issue on Operational Modal Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1209–1212. doi:10.1016/j.ymssp.2010.03.005
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2012). Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. In *Proc. of the 18th International Modal Analysis Conference*. San Antonio, TX. Retrieved from ftp://77.243.49.20/Download/Literature/Papers/2000/2000_2.pdf
- Brownjohn, J. M. W. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 365(1851), 589–622. doi:10.1098/rsta.2006.1925
- Building Seismic Safety Council. NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450) (2006). Washington, D.C.
- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. Reglamento CIRSOC 102-2005. Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones (2005). INTI Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Chatzi, E. (2012). Identification Methods for Structural Systems. Retrieved from http://www.chatzi.ibk.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ibk/structural-mechanics-dam/education/identmeth/lecture9_2013.pdf
- Choi, S., Park, S., & Stubbs, N. (2005). Nondestructive damage detection in structures using changes in compliance. *International Journal of Solids and Structures*, 42(15), 4494–4513. doi:10.1016/j.ijsolstr.2004.12.017
- Comité técnico AEN/CTN 140. (n.d.). Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica. EN1996-1-1. Reglas Generales y Reglas para Edificación.
- Comité Técnico AEN/CTN 140 Eurocódigos estructurales. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (2006). Brussels.
- Compán Cardiel, V., Pachón, P., Cámara Pérez, M., & Sáez Pérez, A. (2015). Model updating of a historical building by using ambient vibration tests . Chapel of the Würzburg Residence (Germany). In *CMMoST 2015. International Conference on Mechanical Models in Structural Engineering* (pp. 361–372). Sevilla. España.
- Computers and Structures Inc. (2011). *CSI Analysis Reference Manual*. Berkeley, California.

- Coppolino, R. N., & Rubin, S. N. (1980). Detectability Of Structural Failures In Offshore Platforms By Ambient Vibration Monitoring. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/3865-MS
- Crohas, H., & Lepert, P. (1982). Damage-detection monitoring method for offshore platforms is field-tested. *Oil Gas J.*; (United States), 80:8(94), 99–100. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/biblio/6592179>
- Cunha, Á., & Caetano, E. (2006). Experimental modal analysis of civil engineering structures. *Sound and Vibration*, (June), 12–20. doi:10.1007/978-1-4020-6239-1_299
- Da Porto, F., Munari, M., Prota, A., & Modena, C. (2013). Analysis and repair of clustered buildings: Case study of a block in the historic city centre of L'Aquila (Central Italy). *Construction and Building Materials*, 38, 1221–1237. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.108
- Davis, D. B. (2008, September 11). Finite Element Modeling for Prediction of Low Frequency Floor Vibrations Due to Walking. Retrieved from <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08122008-202926/>
- Dirección General de Arquitectura. (2006). Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-F. Seguridad estructural: Fábrica. Retrieved from <http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadEstructural/DBSE-F.pdf>
- Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Los Alamos, New Mexico 87545. doi:10.2172/249299
- Duggan, D. M., Wallace, E. R., & Caldwell, S. R. (1980). Measured and Predicted Vibrational Behavior of Gulf of Mexico Platforms. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/3864-MS
- Ewins, D. J. (2000). Basics and state-of-the-art of modal testing. *Sadhana*, 25(June), 207–220. doi:10.1007/BF02703540
- Falcón Márquez, T. (2000). Tipologías constructivas de los palacios sevillanos del siglo XVI. In A. Graciani García, S. Huerta, E. Rabasa, & M. A. Tabales Rodríguez (Eds.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Sevilla 26-28 Octubre 2000 (pp. 279–284). Madrid, Spain: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla.
- Felber, A. J. (1993). Development of a hybrid bridge evaluation system. University of British Columbia, Canada.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency), & ASCE (American Society of Civil Engineers).

FEMA 356 (2000).

Fernández Naranjo, J. A., & Vázquez Teja, F. (1978). El tipo de casa patio. 2C: construcción de la ciudad, (11), 12–13. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/2099/5287>

Friswell, M. I., Penny, J. E. ., & Wilson, D. A. . (1994). Using vibration data and statistical measures to locate damage in structures. *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 9(4), 239–254. Retrieved from http://michael.friswell.com/PDF_Files/J17.pdf

Hazañas y la Rúa, J., & Hohenleiter, F. (1989). La casa sevillana. Sevilla : Padilla Libros. Retrieved from <http://fama.us.es/record=b1004506~S5 spi>

Huete Fuertes, R., Jaramillo-Morilla, A., Rodríguez-Liñán, C., Sanz Cuesta, V., & Suárez Samaniego, L. (2005). Protocolo de inspección técnica de edificaciones ITE. (Colegio Oficial de Arquitectos de Sevilla: Fundación Fidas, Ed.). Sevilla.

International Code Council. UBC 1997 Vol 2 - Structural Engineering Design Provisions (1997). International Code Council.

Jacobsen, N., Andersen, P., & Brincker, R. (2008). Applications of Frequency Domain Curve-fitting in EFDD Technique. *Proceedings IMAC XXVI* Retrieved from http://www.svibs.com/solutions/literature/2008_2.pdf

Jaramillo-Morilla, A., Rodríguez-Liñán, C., de Justo Alpañés, J. L., Romero-Hernández, R., & Pérez-Gálvez, F. (2000). Características de los muros antiguos de Sevilla. In A. Graciani García, S. Huerta, E. Rabasa, & M. A. Tabales Rodríguez (Eds.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Sevilla 26-28 Octubre 2000 (pp. 26–28). Madrid, Spain: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla.

Jiménez-Alonso, J., & Saez Pérez, A. (2012). Application of the operational modal analysis and modal updating methods for the characterization of the longitudinal modulus of an ancient reinforced concrete truss bridge in Almeria (Spain). In F. Biondini & D. M. Frangopol (Eds.), *Sixth International IABMAS Conference* (pp. 2682–2689). Stresa, Lake Maggiore, Italy: CRC Press 2012. doi:10.1201/b12352-411

Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2007). Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 728–739. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728)

Kenley, R. M., & Dodds, C. J. (1980). West Sole WE Platform: Detection Of Damage By Structural Response Measurements. In *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/3866-MS

- Kořakowski, P. (2007). Structural health monitoring—a review with the emphasis on low-frequency methods. *Engineering Transactions*, 55(3), 239–275. Retrieved from <http://etold.ippt.gov.pl/numbers/ET-2007-55-3.pdf#page=43>
- Lagomarsino, S., & Magenes, G. (2009). Evaluation and Reduction of the Vulnerability of Masonry Buildings. In G. Manfredi & M. Dolce (Eds.), *The state of Earthquake Engineering Research in Italy: the ReLUIS-DPC 2005-2008 Project* (pp. 1–50). Doppiavoce, Napoli, Italy.
- Liu, W., Gao, W., Sun, Y., & Xu, M. (2008). Optimal sensor placement for spatial lattice structure based on genetic algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, 317(1-2), 175–189. doi:10.1016/j.jsv.2008.03.026
- Loland, O., & Dodds, C. J. (1976). Experiences in Developing Monitoring Systems and Operating Integrity In the North Sea. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/2551-MS
- Lourenço, P. B., Ramos, L. F., De Roeck, G., & Campos-Costa, A. (2008). Damage identification in masonry structures with vibration measurements. In E. Fodde (Ed.), *Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance*. Proceedings of the VI International Conference on Structural Analysis of Historic Construction, SAHC08 (pp. 311–319). Bath, United Kingdom: CRC Press. doi:doi:10.1201/9781439828229.ch35
- Martínez, J. L., Martín-Caro, J. A., & León, J. (2001). Comportamiento mecánico de la obra de fábrica. *Monografías sobre el análisis estructural de construcciones históricas de fábrica*. (D. de M. de los M. C. y T. de E. E.T.S.Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ed.).
- Masi, A., Mucciarelli, M., Gallipoli, M. R., & Vona, M. (2006). Estimation of the period of vibration of existing RC building types based on experimental data and numerical results. In M. Mucciarelli, M. Herak, & C. John (Eds.), *Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data* (pp. 207–225). Dubrovnik, Croatia: Springer.
- Mauriño Soyo, J. M. (2008). Sevilla: la ocupación del interior de manzana. Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/5069>
- Ministerio de Fomento. NCSE-02. Norma de Construcción Sismorresistente parte general y Edificación. (2002).
- Mora Vicente, G. M. (2011). Ejemplos de arquitectura civil sevillana en los siglos XV y XVI. Elementos constructivos. In S. Huerta Fernández, I. J. Gil Crespo, S. García, & M. Tain (Eds.), *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Santiago de Compostela, 26 - 29 octubre 2011. Madrid, Spain: Instituto Juan de Herrera.
- Nataraja, R. (1983). Structural Integrity Monitoring in Real Seas. In *Offshore Technology Conference*.

ence. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/4538-MS

New Zealand Society for Earthquake Engineering. NZSEE 2006. Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes. Recommendations of a NZSEE Study Group on Earthquake Risk Buildings (2006). Retrieved from http://www.nzsee.org.nz/db/PUBS/2006AISBEGUIDELINES_Corr_06a.pdf

Ollero Lobato, F. (2005). Arquitectura doméstica en Sevilla durante la segunda mitad del siglo XVIII. *Atrio*, 10/11(113), 113–124.

Osegueda, R. ., DSouza, P. ., & Qiang, Y. . (1992). Damage Evaluation of Offshore Structures Using Resonant Frequency Shifts. In 1992 ASMEPVP Conference, ASME (pp. 31–37). New Orleans.

Panda, M. N., Mosher, C. C., & Chopra, A. K. (2000). Application of wavelet transforms to reservoir-data analysis and scaling. *SPE Journal*. Retrieved from <http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=00060845>

Pandey, A. ., & Biswas, M. (1994). Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of Sound and Vibration*, 169, 3–17. doi:10.1006/jsvi.1994.1002

Peeters, B., Vanhollebeke, F., & Van Der Auweraer, H. (2005). Operational PolyMAX for estimating the dynamic properties of a stadium structure during a football game. IMAC-XXIII: Conference & Exposition on Structural Dynamics - Structural Health Monitoring, (1). Retrieved from <http://sem-proceedings.com/23i/sem.org-IMAC-XXIII-Conf-s06p01-Operational-PolyMAX-Estimating-Dynamic-Properties-Stadium-Structure.pdf>

Penny, J. E. ., Wilson, D. A. ., & Friswell, M. I. (1993). Damage Location in Structures Using Vibration Data. In 1993 IMAC XI - 11th International Modal Analysis Conference (pp. 861–867). Kissimmee, Florida, USA. Retrieved from <https://www.sem.org/Proceedings/ConferencePapers-Paper.cfm?ConfPapersPaperID=40883>

Pérez Gálvez, F. (2004). Las obras de fábrica en la arquitectura doméstica sevillana de los siglos XVIII y XIX: características constructivas y parámetros resistentes. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Sevilla. Retrieved from <http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/1950/las-obras-de-fabrica-en-la-arquitectura-domestica-sevillana-de-los-siglos-xviii-y-xix-caracteristicas-constructivas-y-parametros-resistentes/>

Pérez-Gálvez, F., Rodríguez-Liñán, C., & Rubio de Hita, P. (2009). Determinación de las características mecánicas de los muros de fábrica de ladrillo en la arquitectura doméstica sevillana de los siglos XVIII Y XIX. *Informes de La Construcción*, 61(514), 19–28. doi:10.3989/ic.06.001

Perry, J. D. (2003, December 17). A Study of Computer Modeling Techniques to Predict the Response of Floor Systems Due to Walking. Virginia Polytechnic Institute and State University.

Retrieved from <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-12142003-174939/>

- Reynders, E., Teughels, A., & De Roeck, G. (2010). Finite element model updating and structural damage identification using OMAX data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1306–1323. doi:10.1016/j.ymssp.2010.03.014
- Rodrigues, J. (2004). Identificação Modal Estocástica Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil. Engineering Faculty of University of Porto, Portugal. Retrieved from [http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11964/2/Texto integral.pdf](http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11964/2/Texto%20integral.pdf)
- Rodríguez Matienzo, J. (2008). Detección de la presencia de grietas cerradas en elementos tipo viga mediante la transformada wavelet. *Ingeniería Mecánica*, 1, 41–47. Retrieved from http://revistascientificas.cujae.edu.cu/Revistas/Mecanica/Vol-11/1-2008/05_2008_01_41_47.pdf
- Sakamoto, S., & Ghanem, R. (2002). Polynomial Chaos Decomposition for the Simulation of Non-Gaussian Nonstationary Stochastic Processes. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(2), 190–201. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:2(190)
- SENCICO. NTE E.030 de diseño sismorresistente de edificios del Perú (2003). Lima, Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Sevilla. Gerencia Municipal de Urbanismo, García Tapial y León, J., & García Jaén, M. J. (1995). El conjunto histórico de Sevilla : avance del Plan Especial de Protección. Sevilla: Ayuntamiento de Sevilla, Gerencia Municipal de Urbanismo. Retrieved from http://fama.us.es/record=b1230650~S5*sp
- Shrive, N. ., Jessop, E. ., & Khalil, M. . (1976). Stress-Strain Behaviour of Masonry Walls. In *Vth International Brick Masonry Conference* (pp. 453–458). Retrieved from <http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/1979/453.pdf>
- Sierra Delgado, J. R. (1985). El destino de la arquitectura vieja Sevillana. *A&V Monografias*, (4), 24–31. Retrieved from <http://fama2.us.es/earq/pdf/folleto/arquitecturavieja.pdf>
- Sierra Delgado, J. R. (1996). La casa en Sevilla: 1976-1996 [exposición] : Real Monasterio de San Clemente, Sevilla, febrero 1996. Sevilla: Fundación El Monte.
- Sierra Delgado, J. R., & Manzano Martos, R. (1980). Introducción al análisis formal de la arquitectura doméstica popular en Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Sevilla. Retrieved from http://fama.us.es/record=b1123580~S5*sp
- Sirca, G. F., & Adeli, H. (2012). System identification in structural engineering. *Scientia Iranica*, 19(6), 1355–1364. doi:10.1016/j.scient.2012.09.002

- Tena-Colunga, A. (1992). Seismic Evaluation of Unreinforced Masonry Structures with Flexible Diaphragms. *Earthquake Spectra*, 8(2), 305–318. doi:10.1193/1.1585683
- Tena-Colunga, A., & Abrams, D. P. (1996). Seismic Behavior of Structures with Flexible Diaphragms. *Journal of Structural Engineering*, 122(April), 439–445. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:4(439)
- Union Internationales des Chemins de Fer. (1995). CODE UIC 778-3. Recommendations pour l'évaluation de la capacité portante des ponts-voûtes existants en maçonnerie et béton.
- Valluzzi, M. R. (2006). On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation. *Materials and Structures*, 40(7), 723–743. doi:10.1617/s11527-006-9188-7
- Valluzzi, M. R., Cardani, G., Binda, L., & Modena, C. (2004). Seismic vulnerability methods for masonry buildings in historical centres: validation and application for prediction analyses and intervention proposals. In 13 th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada. Retrieved from http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2765.pdf
- Vandiver, J. K. (1975a). Detection of Structural Failure on Fixed Platforms By Measurement of Dynamic Response. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/2267-MS
- Vandiver, J. K. (1975b). Structural evaluation of fixed offshore platforms. Woods Hole, MA: Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution. doi:10.1575/1912/1360
- Whittome, T. ., & Dodds, C. J. (1983). Monitoring Offshore Structures by Vibration Techniques. In Design in Offshore Structures Conference (pp. 93–100).
- Wojnarowski, M. E., Stiansen, S. G., & Reddy, N. E. (1977). Structural Integrity Evaluation Of A Fixed Platform Using Vibration Criteria. In Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. doi:10.4043/2909-MS
- Zavalis, R., Jonaitis, B., & Lourenço, P. B. (2014). Analysis of bed joint influence on masonry modulus of elasticity. In 9th International Masonry Conference.

BIBLIOGRAFÍA

A.1. ANEJO 1

Rutinas en lenguaje Python

A.1.1 CODIGO 1

(Correspondiente al Nodo 17)

```
# =====  
#Calculo de parámetros deribados T1-F  
#V.1 (17/02/2015)  
#Enrique Vazquez  
#  
U=range(12)  
FX = 2 * C1 + 2 * AG + AH  
F2 = (FX - FP2 - 2 * (FP1 + F1)) / 2  
U[0] = 0  
U[1] = F1  
U[2] = U[1] + FP1  
U[3] = C1  
U[4] = U[3] + AG  
U[5] = U[2] + F2  
U[6] = U[5] + FP2  
U[7] = U[4] + AH  
U[8] = U[7] + AG  
U[9] = FX - F1 - FP1  
U[10] = FX - F1  
U[11] = FX  
x = U
```

A.1.2 CODIGO 2

(Correspondiente al Nodo 18)

```
# =====  
#Calculo de parámetros deribados T1-V  
#V.1 (17/02/2015)  
#Enrique Vazquez  
#  
V=range(7)  
V[0] = 0  
V[1] = HA1  
V[2] = HA1 + HD1  
V[3] = H1  
V[4] = V[3] + HA2  
V[5] = V[4] + HD2  
V[6] = H1 + H2  
z = V
```

A.1.3 CODIGO 3

(Correspondiente al Nodo 19)

```
# =====  
#Calculo de parámetros deribados T1-M  
#V.1 (17/02/2015)  
#Enrique Vazquez  
#  
U=range(10)  
FY= C2 + 2 * AG + LH + C3  
U[0] = 0  
U[1] = F3  
U[2] = U[1] + FP3  
U[3] = C2  
U[4] = U[3] + AG  
U[5] = U[4] + F4  
U[6] = U[5] + FP4  
U[7] = U[4] + LH  
U[8] = U[7] + AG  
U[9] = FY  
y = U
```

A.1.4 CODIGO 4

(Correspondiente al Nodo 15)

```
# =====  
#Generación de la lista de nodos de una colección de elementos shell sin duplicar nodos.  
#V.1 (16/04/2015)  
#Enrique Vazquez  
#  
from collections import OrderedDict  
import rhinoscriptsyntax as rs  
  
def Nodos_caras(vertices):  
    """Takes a list of interconnected mesh and returns the start and end  
    points without duplicates in a list."""  
    SYS_PTS = []  
    for nudos in vertices:  
        SYS_PTS.append(nudos)  
    SYS_PTS_NO_DUPS = list(OrderedDict.fromkeys(SYS_PTS))  
    return SYS_PTS_NO_DUPS  
nudos=Nodos_caras(puntos)
```


A.1.5 CODIGO 5

(Correspondiente al Nodo 15)

```
# =====

#Busca las coordenadas de un punto en un listado de nodos y obtiene su número de indice.
#V.1 (15/04/2015)
#Enrique Vazquez
#
from collections import OrderedDict
import rhinoscriptsyntax as rs

# INPUTS
# nudos:     coleccion de coordenadas de nudos a buscar.
# punto_coord: coleccion completa de coordenadas de nudos. Tenemos que buscar
# en esta lista y asignarle el indice.
#
tol=0.00001    #Tolerancia

#Busca cada coordenada en la lista de nudos
numero=[]      #Inicializa la variable
n=nn_inic
for pt in punto_coord:
    for nudo in nudos:
        if rs.Distance(pt,nudo)<tol:
            numero.append(n+1)
            n=n+1
        else:
            n=n+1
n_nudo=numero
```

A.1.6 CODIGO 6

(Correspondiente al Nodo 13)

```
# =====
#Generación del listado de nudos
#V.1 (15/04/2015)
#Enrique Vazquez
#
```

```
import rhinoscriptsyntax as rs
import os

x=[];y=[];z=[] #Inicializa variables
for i in nudos: #lee las cordenadas de nudos
    tx=str(i.X).replace(".",",") #sustituye puntos por comas
    ty=str(i.Y).replace(".",",")
    tz=str(i.Z).replace(".",",")
    x.append(tx)
    y.append(ty)
    z.append(tz)
n_nudos=len(x) #calcula el número de nudos

nn_final=nn_inic+n_nudos #calcula el índice del nudo final

def print_nodes(ruta, n_nudos, nn_inic, x, y, z):
    # Esta funcion escribe en el fichero joint.txt los datos de nodos
    T1="Joint="
    T2=" CoordSys=GLOBAL CoordType=Cartesian XorR="
    T3=" Y="
    T4=" Z="
    T5=" SpecialJt=No GlobalX="
    T6=" GlobalY="
    T7=" GlobalZ="

    nombre_archivo='joint.txt'
    archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
    outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a' (añadir al final)
    outfile.write('TABLE: "JOINT COORDINATES"\n')
    for j in range(0,n_nudos):
        n_nudo=j+nn_inic
        outfile.write(T1+str(n_nudo)+T2+str(x[j])+T3+str(y[j])+T4+str(z[j])+T5+str(x[-
j])+T6+str(y[j])+T7+str(z[j])+'\n')
    outfile.close()

if estado==True:
    print ("True")
    print_nodes(strRuta, n_nudos, nn_inic, x, y, z)
else:
    print ("Fase")
```

A.1.7 CODIGO 7

(Correspondiente al Nodo 14)

```
# =====
#Generación del listado de conectividad de shells y asignacion de secciones
#V.1 (26/04/2015)
#Enrique Vazquez
#
import os

# Inicia variables
cara=[];n_a=[];n_b=[];n_c=[];n_d=[]

# Lee las caras (tipo surface)
for i in caras:
    cara.append(i)

n_caras=len(cara)    #cuenta el numero de caras
n_c_fin=nc_inic+n_caras    # calcula la variable n_c_fin: numero de la cara final

# Para cada nudo de la cas caras genera una lista de numeraciones
for i in n_1:
    n_a.append(i)

for i in n_2:
    n_b.append(i)

for i in n_3:
    n_c.append(i)

for i in n_4:
    n_d.append(i)

def print_caras(ruta, n_caras, nc_inic, n_a, n_b, n_c, n_d):
    # Esta funcion escribe en el fichero caras.txt los datos de conectividad de caras

    T1=" Area="
    T2=" NumJoints=4 Joint1="
    T3=" Joint2="
    T4=" Joint3="
    T5=" Joint4="
    T6=" Perimeter=4 AreaArea=1"
```

```
nombre_archivo='caras.txt'
archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a'(añadir al final)
outfile.write('TABLE: "CONNECTIVITY - AREA"\n')
for j in range(0,n_caras):
    n_cara=j+nc_inic
    outfile.write(T1+str(n_cara)+T2+str(n_a[j])+T3+str(n_b[j])+T4+str(n_c[j])+T5+str(n_d[-
j])+T6+'\n')
outfile.close()
```

```
def print_tiposhell(ruta, n_caras, strASecNomb):
    # Esta funcion escribe en el fichero c_seccion.txt el tipo de sección
```

```
T1=" Area="
T2=" Section="
T3=" MatProp=Default"
```

```
nombre_archivo='c_seccion.txt'
archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a'(añadir al final)
outfile.write('TABLE: "AREA SECTION ASSIGNMENTS"\n')
for j in range(0,n_caras):
    n_cara=j+nc_inic
    outfile.write(T1+str(n_cara)+T2+strASecNomb+T3+'\n')
outfile.close()
```

```
if estado==True:
    print ("True")
    print_caras(strRuta, n_caras, nc_inic, n_a, n_b, n_c, n_d)
    print_tiposhell(strRuta, n_caras, strASecNomb)
else:
    print ("Fase")
```

A.1.8 CODIGO 8

(Correspondiente al Nodo 3)

```
# =====
# Generación del listado de asignacion de cargas a elementos shell
# V.1 (26/04/2015)
# Enrique Vazquez
#
import os

def print_areaload(ruta, nc_inic, nc_fin, strLoadPat, strCoordSys, strDir, strUnifLoad):
    # Esta funcion escribe en el fichero areaload.txt las cargas sobre elementos shell
    nombre_archivo='areaload.txt'
    archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
    outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a'(añadir al final)
    outfile.write('TABLE: "AREA LOADS - UNIFORM"\n')
    for j in range(nc_inic, nc_fin):
        outfile.write(' Area='+str(j)+' LoadPat="'+strLoadPat+'" CoordSys='+strCoordSys+' Dir='+strDir+'
UnifLoad='+strUnifLoad+'\n')
        outfile.write('\n')
    outfile.close()

if estado==True:
    print ("True")
    print_areaload(strRuta, nc_inic, nc_fin, strLoadPat, strCoordSys, strDir, strUnifLoad)
else:
    print ("Fase")
```

A.1.9 CODIGO 9

```
# =====
#Generación del listado de asignacion de vinculaciones en la base
#V.1 (27/04/2015)
#Enrique Vazquez
#
import os

def print_coacciones(ruta):
    # Esta funcion escribe en el fichero coacciones.txt las cargas sobre elementos shell
```

```
nombre_entrada='joint.txt'
entrada=ruta+'\\'+nombre_entrada
infile = open(os.path.join(os.getcwd(), entrada), 'r')

nombre_salida='coacciones.txt'
salida=ruta+'\\'+nombre_salida
outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), salida), 'w') # Indicamos 'a' (añadir al final)
outfile.write('JOINT RESTRAINT ASSIGNMENTS"\n')

for linea in infile:
    comparador = linea.find(' Z=0,0')
    if comparador > 0:
        #nudo=linea[6:9]
outfile.write(' Joint='+linea[6:9]+' U1=Yes U2=Yes U3=Yes R1=Yes R2=Yes R3=Yes'+'\n')
infile.close()
outfile.write('\n')
outfile.close()

if estado==True:
    print ("True")
    print_coacciones(strRuta)
    continua=True

else:
    print ("Fase")
    continua=False
```

A.1.10 CODIGO 10

(Correspondiente al Nodo 6)

```
# =====
#Empaquetado de los archivos en un documento único
#V.1 (27/04/2015)
#Enrique Vazquez
#
import os

def une_archivos(ruta, NombArchivo):
    # Esta función lee los archivos y genera un archivo único
    origenes = ['cabecera.txt', 'material.txt', 'c_seccion.txt', 'joint.txt', 'caras.txt', 'loadpattern.
```

```
txt', 'area_sec.txt', 'areaload.txt', 'coacciones.txt']
    archivo_salida=ruta+'\\'+NombArchivo
    with open(os.path.join(os.getcwd(), archivo_salida), 'w') as dest:
        for origen in origenes:
            archivo_entrada=ruta+'\\'+origen
            with open(os.path.join(os.getcwd(), archivo_entrada)) as o:
                dest.write(o.read())

if estado==True:
    print ("True")
    une_archivos(strRuta, strNombArchivo)
    continua=True

else:
    print ("Fase")
    continua=False
```

A.1.11 CODIGO 11

(Correspondiente al Nodo 16)

```
# =====
#Busca las coordenadas de un punto en un listado de nodos y obtiene su número de indice.
#V.1 (15/04/2015)
#Enrique Vazquez
#

from collections import OrderedDict
import rhinoscriptsyntax as rs

#"""
INPUTS
nodos:    coleccion de coordenadas de nodos a buscar.
punto_coord: coleccion completa de coordenadas de nodos. Tenemos que buscar
            en esta lista y asignarle el indice.
#"""

tol=0.00001 #Tolerancia

#Busca cada coordenada en la lista de nodos
numero=[] ##Inicializa la variable
```



```
for pt in punto_coord:
    n=nn_inic
    for nudo in nudos:
        if rs.Distance(pt,nudo)<tol:
            numero.append(n)
            n=n+1
        else:
            n=n+1

n_nudo=numero
```

A.1.12 CODIGO 12

```
""" =====
```

Generación del fichero de definición de materiales en Sap2000

V.1 (16/04/2015)

Enrique Vazquez

```
"""
```

```
import os
```

```
def print_material(ruta, strMatNomb, strMatType, strMatSymType, strMatColor, strMatNotas,
strMatWeight, strMatMass, strMatE1, strMatG12, strMatU12, strMatA1):
```

```
    """Esta funcion escribe en el fichero material.txt los datos iniciales"""
```

```
    nombre_archivo='material.txt'
```

```
    archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
```

```
    outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a'(añadir al final)
```

```
    outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 01 - GENERAL"\n')
```

```
    outfile.write(' Material="'+strMatNomb+'" Type='+strMatType+' SymType='+strMatSymType)
```

```
    outfile.write(' TempDepend=No Color='+strMatColor+' Notes="'+strMatNotas+'" \n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
    outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 02 - BASIC MECHANICAL PROPERTIES"\n')
```

```
    outfile.write('          Material="'+strMatNomb+'"          UnitWeight='+strMatWeight+' \n')
```

```
    UnitMass='+strMatMass)
```

```
    outfile.write(' E1='+strMatE1+' G12='+strMatG12+' U12='+strMatU12+' A1='+strMatA1+' \n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
if strMatType=="Steel":
    print ("acero")
    outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 03A - STEEL DATA"\n')
    outfile.write(' Material="'+strMatNomb+'" Fy='+strMatFy+' Fu='+strMatFu)
outfile.write(' SSCurveOpt=Simple SSHysType=Kinematic SHard=0,015 SMax=0,11 SRup=0,17
FinalSlope=-0,1\n')
    outfile.write('\n')

if strMatType=="Concrete":
    outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 03B - CONCRETE DATA"\n')
outfile.write(' Material="'+strMatNomb+'" Fc='+strMatFc+' LtWtConc=No SSCurveOpt=Mander
SSHysType=Takeda SFc='+strMatSFc)
    outfile.write(' SCap=0,005 FinalSlope=-0,1 FAngle=0 DAngle=0\n')
    outfile.write('\n')

    outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 06 - DAMPING PARAMETERS"\n')
outfile.write(' Material="'+strMatNomb+'" ModalRatio=0 VisMass=0 VisStiff=0 HysMass=0
HysStiff=0\n')
    outfile.write('\n')
    outfile.close()

if estado==True:
    print ("True")
    print_material(strRuta, strMatNomb, strMatType, strMatSymType, strMatColor, strMatNotas,
strMatWeight, strMatMass, strMatE1, strMatG12, strMatU12, strMatA1)
    fin=True
else:
    print ("Fase")
    fin=False
```

A.1.13 CODIGO 13

(Correspondiente al Nodo 4)

```
""" =====
```

Generación del fichero de definición de secciones tipo shell en Sap2000

V.1 (20/04/2015)

Enrique Vazquez

```
"""
```

```
import os
```

```
def print_seccion(ruta, strASecNomb, strMatNomb, strASecType, strAThick, strANota, strAColor, strAF11, strAF22, strAF12, strAM11, strAM22, strAM12, strAV13, strAV23, strAPeso, strAMasa):
```

```
    """Esta funcion escribe en el fichero area_sec.txt las secciones"""
```

```
    nombre_archivo='area_sec.txt'
```

```
    archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
```

```
    outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a'(añadir al final)
```

```
    outfile.write('TABLE: "AREA SECTION PROPERTIES"\n')
```

```
    outfile.write(' Section="'+strASecNomb+'" Material="'+strMatNomb+'" MatAngle=0
```

```
AreaType=Shell Type='+strASecType)
```

```
    outfile.write(' DrillDOF=Yes Thickness='+strAThick+' Color='+strAColor)
```

```
    outfile.write(' F11Mod='+strAF11+' F22Mod='+strAF22+' F12Mod='+strAF12)
```

```
    outfile.write(' M11Mod='+strAM11+' M22Mod='+strAM22+' M12Mod='+strAM12)
```

```
    outfile.write(' V13Mod='+strAV13+' V23Mod='+strAV23+' MMod='+strAMasa)
```

```
    outfile.write(' WMod='+strAPeso+' Notes="'+ strANota+'" \n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
    outfile.write('TABLE: "AREA SECTION PROPERTY DESIGN PARAMETERS"\n')
```

```
    outfile.write(' Section="'+strASecNomb+'" RebarMat=None RebarOpt=Default\n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
    outfile.close()
```

```
if estado==True:
```

```
    print ("True")
```

```
    print_seccion(strRuta, strASecNomb, strMatNomb, strASecType, strAThick, strANota, strAColor, strAF11, strAF22, strAF12, strAM11, strAM22, strAM12, strAV13, strAV23, strAPeso, strAMasa)
```

```
    fin=True
```

```
else:
```

```
    print ("Fase")
```

```
    fin=False
```

A.1.14 CODIGO 14

(Correspondiente al Nodo 5)

```
""" =====
```

Generación de la cabecera de Sap2000

V.1 (16/04/2015)

Enrique Vazquez

```
"""
```

```
import os
```

```
import time
```

```
def print_cabecera(ruta, NombArchivo):
```

```
    """Esta funcion escribe en el fichero cabecera.txt los datos iniciales"""
```

```
    nombre_archivo='cabecera.txt'
```

```
    archivo_salida=NombArchivo
```

```
    archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
```

```
    outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'w') # Indicamos 'w' (escribir desde cero)
```

```
    outfile.write('File ' + os.path.join(os.getcwd(), archivo_salida) + ' was saved on ' + time.
```

```
    strftime("%d/%m/%y") + ' at ' + time.strftime("%H:%M:%S")+ ' \n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
    outfile.write('TABLE: "PROGRAM CONTROL"\n')
```

```
    outfile.write('      ProgramName=SAP2000      Version=15.1.0      ProgLevel=Ultimate
LicenseNum=1DBC1 LicenseOS=Yes LicenseSC=Yes LicenseBR=No LicenseHT=No CurrUnits="KN,
m, C" SteelCode=AISC360-05/IBC2006 ConcCode="ACI 318-05/IBC2003" _\n')
```

```
    outfile.write('      AlumCode="AA-ASD 2000" ColdCode=AISI-ASD96 BridgeCode="AASHTO
LRFD 2007" RegenHinge=Yes\n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
    outfile.write('TABLE: "ACTIVE DEGREES OF FREEDOM"\n')
```

```
    outfile.write('      UX=Yes UY=Yes UZ=Yes RX=Yes RY=Yes RZ=Yes\n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
    outfile.write('TABLE: "ANALYSIS OPTIONS"\n')
```

```
    outfile.write('      Solver=Advanced SolverProc=Auto Force32Bit=No StiffCase=None
GeomMod=No\n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
    outfile.write('TABLE: "COORDINATE SYSTEMS"\n')
```

```
    outfile.write('      Name=GLOBAL Type=Cartesian X=0 Y=0 Z=0 AboutZ=0 AboutY=0
AboutX=0\n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
    outfile.write('TABLE: "GRID LINES"\n')
```

```
    outfile.write(' \n')
```

```
    outfile.close()
```

```
if estado==True:
    print ("True")
    print_cabecera(strRuta, strNombArchivo)
    fin=True

else:
    print ("Fase")
    fin=False
```

A.1.15 CODIGO 15

(Correspondiente al Nodo 7)

```
""" =====
```

Borrado de los archivos temporales

V.1 (28/04/2015)

Enrique Vazquez

```
"""
```

```
import os
```

```
def borra_archivos(ruta):
```

```
    # Esta función lee los archivos y genera un archivo único
```

```
    origenes = ['cabecera.txt', 'material.txt', 'area_sec.txt', 'loadpattern.txt', 'loadcase.txt',
'joint.txt', 'caras.txt', 'c_seccion.txt', 'areaload.txt', 'coacciones.txt']
```

```
    for origen in origenes:
```

```
        archivo_borra=ruta+'\\'+origen
```

```
        os.remove(os.path.join(os.getcwd(), archivo_borra))
```

```
if estado==True:
```

```
    print ("True")
```

```
    borra_archivos(strRuta)
```

```
    fin=True
```

```
else:
```

```
    print ("Fase")
```

```
    fin=False
```

A.1.16 CODIGO 16

(Correspondiente al Nodo 8)

```
""" =====
```

Generación del fichero de definición de materiales en Sap2000

V.1 (16/04/2015)

Enrique Vazquez

```
"""
```

```
import os
```

```
def print_material(ruta, strMatNomb, strMatType, strMatSymType, strMatColor, strMatNotas,
strMatWeight, strMatMass, strMatE1, strMatG12, strMatU12, strMatA1):
```

```
    """Esta funcion escribe en el fichero material.txt los datos iniciales"""
```

```
    nombre_archivo='material.txt'
```

```
    archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
```

```
    outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a'(añadir al final)
```

```
    outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 01 - GENERAL"\n')
```

```
    outfile.write('                Material="'+strMatNomb+'"                Type='+strMatType+''
```

```
SymType='+strMatSymType)
```

```
    outfile.write(' TempDepend=No Color='+strMatColor+' Notes="'+strMatNotas+'"'\n')
```

```
    outfile.write('\n')
```

```
    outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 02 - BASIC MECHANICAL PROPERTIES"\n')
```

```
    outfile.write('                Material="'+strMatNomb+'"                UnitWeight='+strMatWeight+''
```

```
UnitMass='+strMatMass)
```

```
    outfile.write('                E1='+strMatE1+'                G12='+strMatG12+'                U12='+strMatU12+''
```

```
A1='+strMatA1+'\n')
```

```
    outfile.write('\n')
```

```
    if strMatType=="Steel":
```

```
        print ("acero")
```

```
        outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 03A - STEEL DATA"\n')
```

```
        outfile.write(' Material="'+strMatNomb+'" Fy='+strMatFy+' Fu='+strMatFu)
```

```
        outfile.write(' SSCurveOpt=Simple SSHysType=Kinematic SHard=0,015 SMax=0,11
SRup=0,17 FinalSlope=-0,1\n')
```

```
        outfile.write('\n')
```

```
    if strMatType=="Concrete":
```

```
        outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 03B - CONCRETE DATA"\n')
```

```
        outfile.write(' Material="'+strMatNomb+'" Fc='+strMatFc+' LtWtConc=No
```

```
SSCurveOpt=Mander SSHysType=Takeda SFc='+strMatSFc)
    outfile.write(' SCap=0,005 FinalSlope=-0,1 FAngle=0 DAngle=0\n')
    outfile.write('\n')

    outfile.write('TABLE: "MATERIAL PROPERTIES 06 - DAMPING PARAMETERS"\n')
outfile.write(' Material="'+strMatNomb+'" ModalRatio=0 VisMass=0 VisStiff=0 HysMass=0
HysStiff=0\n')
    outfile.write('\n')
    outfile.close()

if estado==True:
    print ("True")
    print_material(strRuta, strMatNomb, strMatType, strMatSymType, strMatColor, strMatNotas,
strMatWeight, strMatMass, strMatE1, strMatG12, strMatU12, strMatA1)
    fin=True
else:
    print ("Fase")
    fin=False
```


A.1.17 CODIGO 17

(Correspondiente al Nodo 9)

```
""" =====
"""
```

Generación del fichero de definición de secciones tipo shell en Sap2000

V.1 (20/04/2015)

Enrique Vazquez

```
"""
```

```
import os
```

```
def print_seccion(ruta, strASecNomb, strMatNomb, strASecType, strAThick, strANota, strAColor,
strAF11, strAF22, strAF12, strAM11, strAM22, strAM12, strAV13, strAV23, strAPeso, strAMasa):
```

```
    """Esta funcion escribe en el fichero area_sec.txt las secciones"""
```

```
    nombre_archivo='area_sec.txt'
```

```
    archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
```

```
    outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a' (añadir al final)
```

```
    outfile.write('TABLE: "AREA SECTION PROPERTIES"\n')
```

```
    outfile.write(' Section="'+strASecNomb+'" Material="'+strMatNomb+'" MatAngle=0
```

```
AreaType=Shell Type='+strASecType)
```

```
    outfile.write(' DrillDOF=Yes Thickness='+strAThick+' Color='+strAColor)
```

```
    outfile.write(' F11Mod='+strAF11+' F22Mod='+strAF22+' F12Mod='+strAF12)
```

```
    outfile.write(' M11Mod='+strAM11+' M22Mod='+strAM22+' M12Mod='+strAM12)
```

```
    outfile.write(' V13Mod='+strAV13+' V23Mod='+strAV23+' MMod='+strAMasa)
```

```
    outfile.write(' WMod='+strAPeso+' Notes="'+ strANota+'"'\n')
```

```
    outfile.write('\n')
```

```
    outfile.write('TABLE: "AREA SECTION PROPERTY DESIGN PARAMETERS"\n')
```

```
    outfile.write(' Section="'+strASecNomb+'" RebarMat=None RebarOpt=Default\n')
```

```
    outfile.write('\n')
```

```
    outfile.close()
```

```
if estado==True:
```

```
    print ("True")
```

```
    print_seccion(strRuta, strASecNomb, strMatNomb, strASecType, strAThick, strANota, strAColor,
strAF11, strAF22, strAF12, strAM11, strAM22, strAM12, strAV13, strAV23, strAPeso, strAMasa)
```

```
    fin=True
```

```
else:
```

```
print ("Fase")
fin=False
```

A.1.18 CODIGO 18

(Correspondiente al Nodo 10)

```
""" =====
```

Generación de la definición de Loads Pattern en Sap2000

V.1 (26/04/2015)

Enrique Vazquez

```
"""
```

```
import os
```

```
# Inicia variables
```

```
LoadPat=[]; DesignType=[]; SelfWtMult=[]
```

```
# Lee los Load Pattern
```

```
for i in strLoadPat:
```

```
    LoadPat.append(i)
```

```
for i in strDesignType:
```

```
    DesignType.append(i)
```

```
for i in strSelfWtMult:
```

```
    SelfWtMult.append(i)
```

```
n_LP=len(LoadPat) #cuenta el numero de Load Pattern
```

```
def print_loadpattern(ruta, n_LP, LoadPat, DesignType, SelfWtMult):
```

```
    """Esta funcion escribe en el fichero loadpattern.txt los load patern"""
```

```
    nombre_archivo='loadpattern.txt'
```

```
    archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
```

```
    outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a' (añadir al final)
```

```
    outfile.write('TABLE: "LOAD PATTERN DEFINITIONS"\n')
```

```
    for j in range(0,n_LP):
```

```
        outfile.write('          LoadPat="'+LoadPat[j]+'          DesignType='+DesignType[j]+'          SelfWtMult='+SelfWtMult[j]+'\\n')
```

```
SelfWtMult='+SelfWtMult[j]+'\\n')
```

```
    outfile.close()
```

```
if estado==True:
    print ("True")
    print_loadpattern(strRuta, n_LP, LoadPat, DesignType, SelfWtMult)
    fin=True
else:
    print ("Fase")
    fin=False
```

A.1.19 CODIGO 19

(Correspondiente al Nodo 11)

```
""" =====
```

Generación de la definición de Loads Cases en Sap2000

V.1 (27/04/2015)

Enrique Vazquez

```
"""
```

```
import os
```

```
def print_loadpattern(ruta, strLC_CC, strLC_SCU, strLP_CC, strLP_SCU):
    """Esta funcion escribe en el fichero loadcase.txt los load patern"""
    nombre_archivo='loadcase.txt'
    archivo=ruta+'\\'+nombre_archivo
    outfile = open(os.path.join(os.getcwd(), archivo), 'a') # Indicamos 'a' (añadir al final)
    outfile.write('TABLE: "LOAD CASE DEFINITIONS"\n')
    outfile.write(' Case=' + strLC_CC + ' Type=LinStatic InitialCond=Zero DesTypeOpt="Prog
Det" DesignType=LIVE DesActOpt="Prog Det" DesignAct="Short-Term Composite"
AutoType=None RunCase=Yes CaseStatus="Not Run"\n')
    outfile.write(' Case=' + strLC_SCU + ' Type=LinStatic InitialCond=Zero DesTypeOpt="Prog
Det" DesignType=LIVE DesActOpt="Prog Det" DesignAct="Short-Term Composite"
AutoType=None RunCase=Yes CaseStatus="Not Run"\n')
    outfile.write(' Case=MODAL Type=LinModal InitialCond=Zero DesTypeOpt="Prog Det"
DesignType=OTHER DesActOpt="Prog Det" DesignAct=Other AutoType=None RunCase=Yes
CaseStatus="Not Run"\n')
    outfile.write('\n')

    outfile.write('TABLE: "CASE - STATIC 1 - LOAD ASSIGNMENTS"\n')
    for CC in strLP_CC:
        outfile.write(' Case='+strLC_CC+' LoadType="Load pattern" LoadName='+ CC +'
```

```
LoadSF=1\n')
    outfile.write(' Case='+strLC_SCU+' LoadType="Load pattern" LoadName='+ strLP_SCU
+' LoadSF=1\n')
    outfile.write('\n')

    outfile.write('TABLE: "CASE - MODAL 1 - GENERAL"\n')
    outfile.write(' Case=MODAL ModeType=Eigen MaxNumModes=12 MinNumModes=1
EigenShift=0 EigenCutoff=0 EigenTol=0,000000001 AutoShift=Yes\n')
    outfile.write('\n')
    outfile.close()

if estado==True:
    print ("True")
    print_loadpattern(strRuta, strLC_CC, strLC_SCU, strLP_CC, strLP_SCU)
    fin=True
else:
    print ("Fase")
    fin=False
```

A.2. ANEJO 2

Parámetros estimados para forjados equivalentes

Forjado de viguetas de madera aserrada y tablazón de madera

Peso específico estructural	$\gamma_e := 7 \frac{kN}{m^3}$		
intereje	$e := 40 \text{ cm}$		
Canto de la vigueta	$b := 18 \text{ cm}$		
Ancho de la vigueta	$a := 14 \text{ cm}$		
Inercia de la vigueta	$I_y := \frac{a \cdot b^3}{12} = 6804 \text{ cm}^4$		
Canto equivalente	$b_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_y}{e}} = 12,6851 \text{ cm}$		
Peso equivalente	$PP_{eq} := \gamma_e \cdot b_{eq} = 0,888 \frac{kN}{m^2}$		
Peso real	$PP := 0,6 \frac{kN}{m^2}$	$CM := 1 \frac{kN}{m^2}$	$CC := PP + CM = 1,6 \frac{kN}{m^2}$
Coeficientes modificadores			
Peso	$\gamma_{cc} := \frac{CC}{PP_{eq}} = 1,8019$		
M22	$C_{mod_M_{22}} := 1 \cdot 10^{-10}$		
F12	$C_{mod_F_{12}} := 0,0025$		

Forjado de viguetas de madera y tablero de doble rasilla

Peso específico estructural $\gamma_e := 5 \frac{kN}{m^3}$

intereje $e := 40 \text{ cm}$

Canto de la vigueta $b := 18 \text{ cm}$

Ancho de la vigueta $a := 14 \text{ cm}$

Inercia de la vigueta $I_y := \frac{a \cdot b^3}{12} = 6804 \text{ cm}^4$

Canto equivalente $b_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_y}{e}} = 12,6851 \text{ cm}$

Peso equivalente $PP_{eq} := \gamma_e \cdot b_{eq} = 0,6343 \frac{kN}{m^2}$

Peso real $PP := 1,25 \frac{kN}{m^2}$ $CM := 1 \frac{kN}{m^2}$ $CC := PP + CM = 2,25 \frac{kN}{m^2}$

Coefficientes modificadores

Peso $\gamma_{cc} := \frac{CC}{PP_{eq}} = 3,5475$

M22 $C_{mod_M_{22}} := 1 \cdot 10^{-10}$

F12 $C_{mod_F_{12}} := 0,0025$

Forjado de viguetas de madera aserrada y revoltón de rasilla

Peso específico estructural	$\gamma_e := 5 \frac{kN}{m^3}$		
intereje	$e := 55 \text{ cm}$		
Canto de la vigueta	$b := 18 \text{ cm}$		
Ancho de la vigueta	$a := 14 \text{ cm}$		
Inercia de la vigueta	$I_y := \frac{a \cdot b^3}{12} = 6804 \text{ cm}^4$		
Canto equivalente	$b_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_y}{e}} = 11,4076 \text{ cm}$		
Peso equivalente	$PP_{eq} := \gamma_e \cdot b_{eq} = 0,5704 \frac{kN}{m^2}$		
Peso real	$PP := 1,4 \frac{kN}{m^2}$	$CM := 1 \frac{kN}{m^2}$	$CC := PP + CM = 2,4 \frac{kN}{m^2}$
Coeficientes modificadores			
Peso	$\gamma_{CC} := \frac{CC}{PP_{eq}} = 4,2077$		
M22	$C_{mod_M_{22}} := 1 \cdot 10^{-10}$		
F12	$C_{mod_F_{12}} := 0,0025$		

Forjado de rollizos y tablero de madera

Peso específico estructural $\gamma_e := 5 \frac{kN}{m^3}$

intereje $e := 40 \text{ cm}$

Diámetro del rollizo $a := 10 \text{ cm}$

Inercia de la vigueta $I_y := \frac{\pi \cdot a^4}{64} = 490,8739 \text{ cm}^4$

Canto equivalente $b_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_y}{e}} = 5,2808 \text{ cm}$

Peso equivalente $PP_{eq} := \gamma_e \cdot b_{eq} = 0,264 \frac{kN}{m^2}$

Peso real $PP := 0,5 \frac{kN}{m^2}$ $CM := 1 \frac{kN}{m^2}$ $CC := PP + CM = 1,5 \frac{kN}{m^2}$

Coeficientes modificadores

Peso $\gamma_{cc} := \frac{CC}{PP_{eq}} = 5,681$

M22 $C_{mod_M22} := 1 \cdot 10^{-10}$

F12 $C_{mod_F12} := 0,0025$

Forjado de rollizos y tablero de doble rasilla

Peso específico estructural $\gamma_e := 5 \frac{kN}{m^3}$

intereje $e := 40 \text{ cm}$

Diámetro del rollizo $a := 10 \text{ cm}$

Inercia de la vigueta $I_y := \frac{\pi \cdot a^4}{64} = 490,8739 \text{ cm}^4$

Canto equivalente $b_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_y}{e}} = 5,2808 \text{ cm}$

Peso equivalente $PP_{eq} := \gamma_e \cdot b_{eq} = 0,264 \frac{kN}{m^2}$

Peso real $PP := 1,5 \frac{kN}{m^2}$ $CM := 1 \frac{kN}{m^2}$ $CC := PP + CM = 2,5 \frac{kN}{m^2}$

Coeficientes modificadores

Peso $\gamma_{CC} := \frac{CC}{PP_{eq}} = 9,4683$

M22 $C_{mod_M_{22}} := 1 \cdot 10^{-10}$

F12 $C_{mod_F_{12}} := 0,0025$

Forjado de viguetas de acero y revoltón sin capa de compr.

Peso específico estructural $\gamma_e := 78,5 \frac{kN}{m^3}$

intereje $e := 70 \text{ cm}$

Canto de la vigueta (IPN 120) $b := 12 \text{ cm}$

Inercia de la vigueta $I_y := 328 \text{ cm}^4$

Canto equivalente $b_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_y}{e}} = 3,8311 \text{ cm}$

Peso equivalente $PP_{eq} := \gamma_e \cdot b_{eq} = 3,0074 \frac{kN}{m^2}$

Peso real $PP := 1,7 \frac{kN}{m^2}$ $CM := 1 \frac{kN}{m^2}$ $CC := PP + CM = 2,7 \frac{kN}{m^2}$

Coefficientes modificadores

Peso $\gamma_{cc} := \frac{CC}{PP_{eq}} = 0,8978$

M22 $C_{mod_M_{22}} := 1 \cdot 10^{-10}$

F12 $C_{mod_F_{12}} := 0,01$

Forjado de viguetas de acero y bovedilla sin capa de compr.

Peso específico estructural $\gamma_e := 78,5 \frac{kN}{m^3}$

intereje $e := 60 \text{ cm}$

Canto de la vigueta (IPN 120) $b := 12 \text{ cm}$

Inercia de la vigueta $I_y := 328 \text{ cm}^4$

Canto equivalente $b_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_y}{e}} = 4,0331 \text{ cm}$

Peso equivalente $PP_{eq} := \gamma_e \cdot b_{eq} = 3,166 \frac{kN}{m^2}$

Peso real $PP := 1,4 \frac{kN}{m^2}$ $CM := 1 \frac{kN}{m^2}$ $CC := PP + CM = 2,4 \frac{kN}{m^2}$

Coefficientes modificadores

Peso $\gamma_{cc} := \frac{CC}{PP_{eq}} = 0,7581$

M22 $C_{mod_M_{22}} := 1 \cdot 10^{-10}$

F12 $C_{mod_F_{12}} := 0,01$

Forjado de viguetas de hormigón y revoltón sin capa de comp.

Peso específico estructural $\gamma_e := 25 \frac{kN}{m^3}$

intereje $e := 60 \text{ cm}$

Canto de la vigueta $b := 18 \text{ cm}$

Inercia de la vigueta $I_y := 664,8 \text{ cm}^4$

Canto equivalente $b_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_y}{e}} = 5,104 \text{ cm}$

Peso equivalente $PP_{eq} := \gamma_e \cdot b_{eq} = 1,276 \frac{kN}{m^2}$

Peso real $PP := 2,2 \frac{kN}{m^2}$ $CM := 1 \frac{kN}{m^2}$ $CC := PP + CM = 3,2 \frac{kN}{m^2}$

Coeficientes modificadores

Peso $\gamma_{cc} := \frac{CC}{PP_{eq}} = 2,5079$

M22 $C_{mod_M_{22}} := 1 \cdot 10^{-10}$

F12 $C_{mod_F_{12}} := 0,01$

Forjado de viguetas de hormigón y bovedilla sin capa compr.

Peso específico estructural $\gamma_e := 25 \frac{kN}{m^3}$

intereje $e := 70 \text{ cm}$

Canto de la vigueta (IPN 120) $b := 18 \text{ cm}$

Inercia de la vigueta $I_y := 664,8 \text{ cm}^4$

Canto equivalente $b_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_y}{e}} = 4,8483 \text{ cm}$

Peso equivalente $PP_{eq} := \gamma_e \cdot b_{eq} = 1,2121 \frac{kN}{m^2}$

Peso real $PP := 1,3 \frac{kN}{m^2}$ $CM := 1 \frac{kN}{m^2}$ $CC := PP + CM = 2,3 \frac{kN}{m^2}$

Coefficientes modificadores

Peso $\gamma_{cc} := \frac{CC}{PP_{eq}} = 1,8976$

M22 $C_{mod_M_{22}} := 1 \cdot 10^{-10}$

F12 $C_{mod_F_{12}} := 0,01$

A.3. ANEJO 3

Gráficas

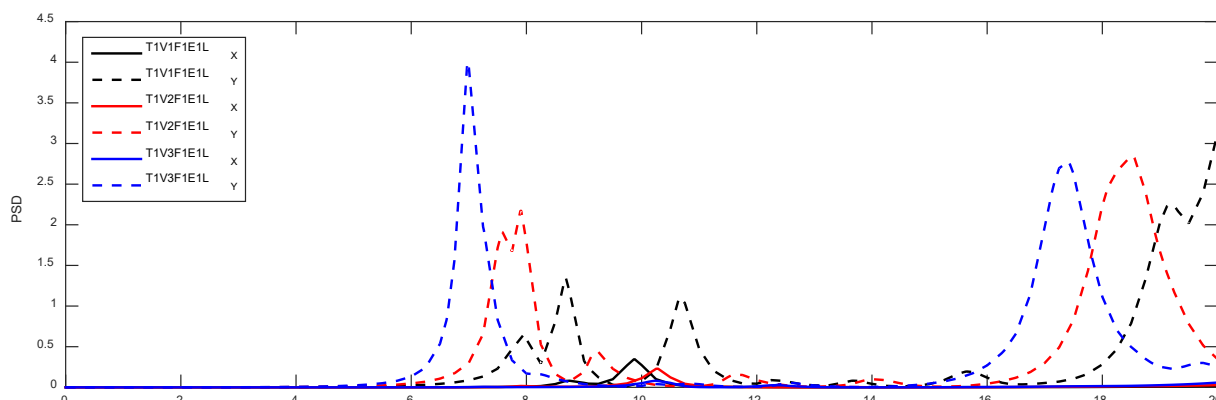


Fig 25-1: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1

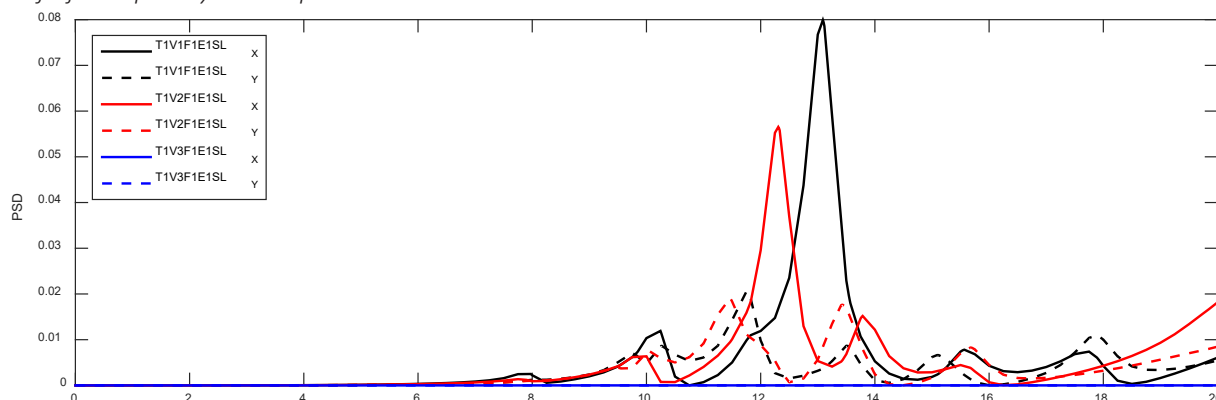


Fig 25-2: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F1 y sin lesiones

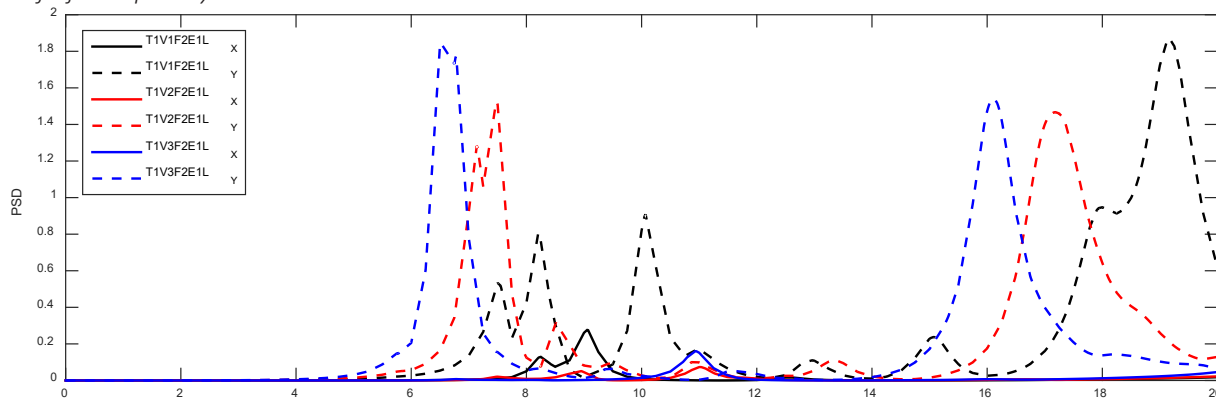


Fig 25-3: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1

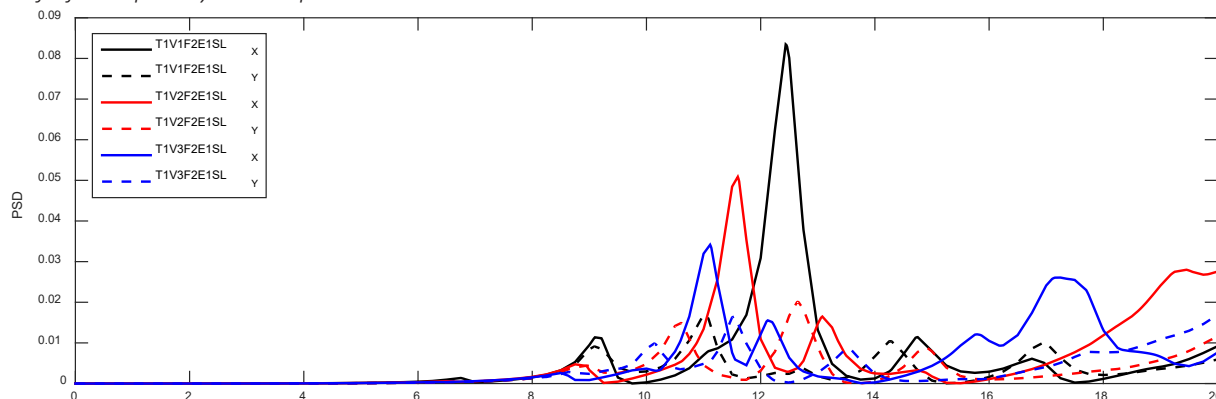


Fig 25-4: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F2 y sin lesiones

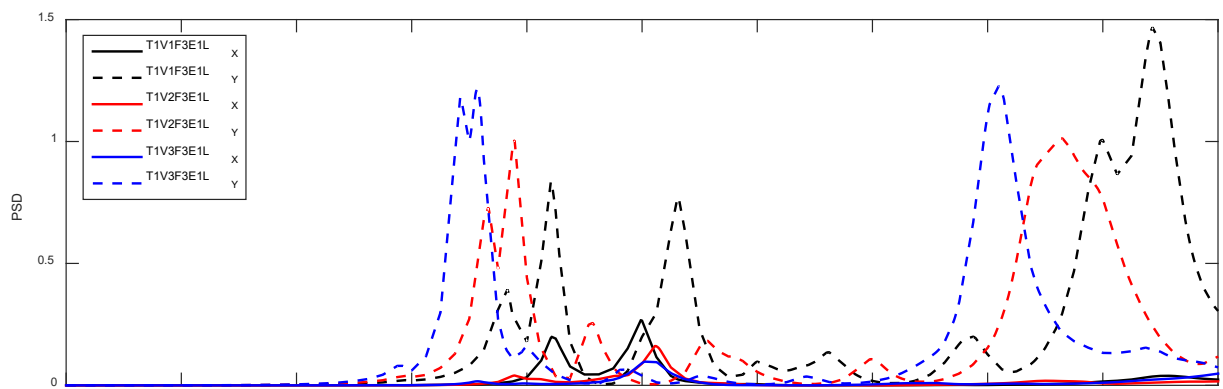


Fig 25-5: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1

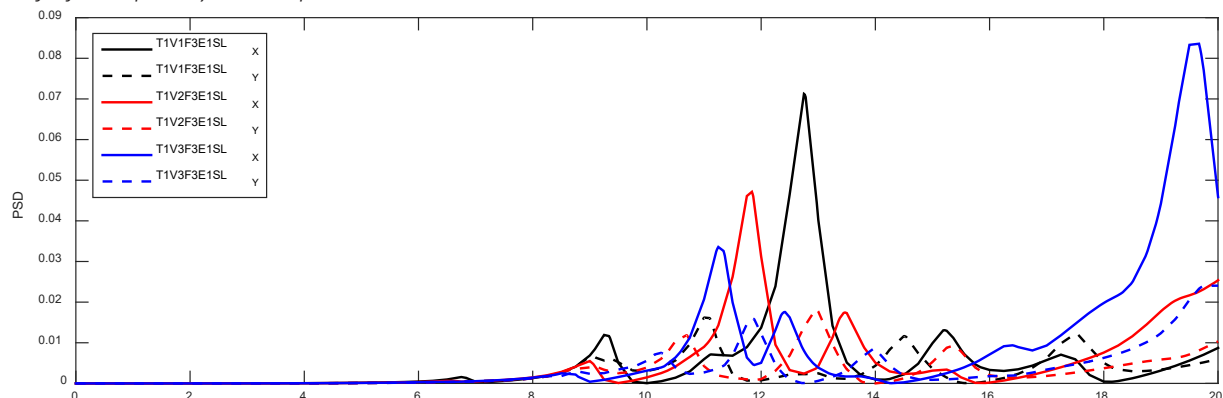


Fig 25-6: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F3 y sin lesiones

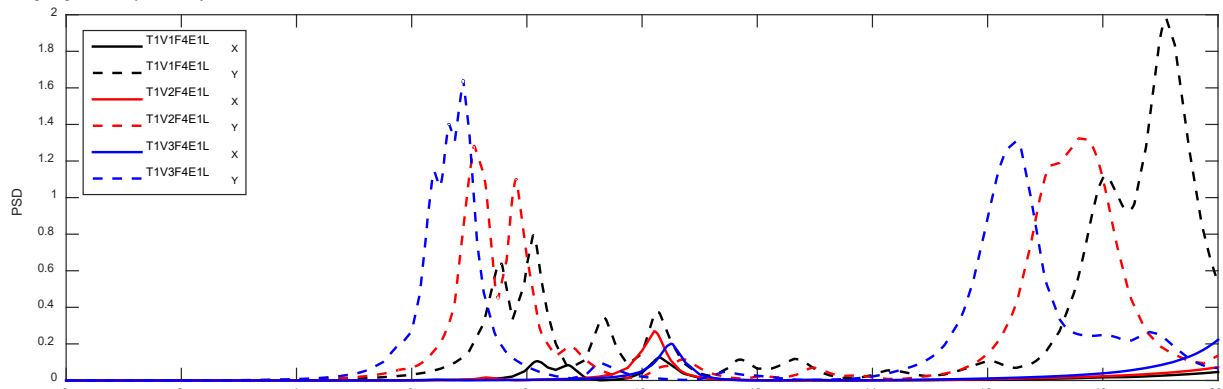


Fig 25-7: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1

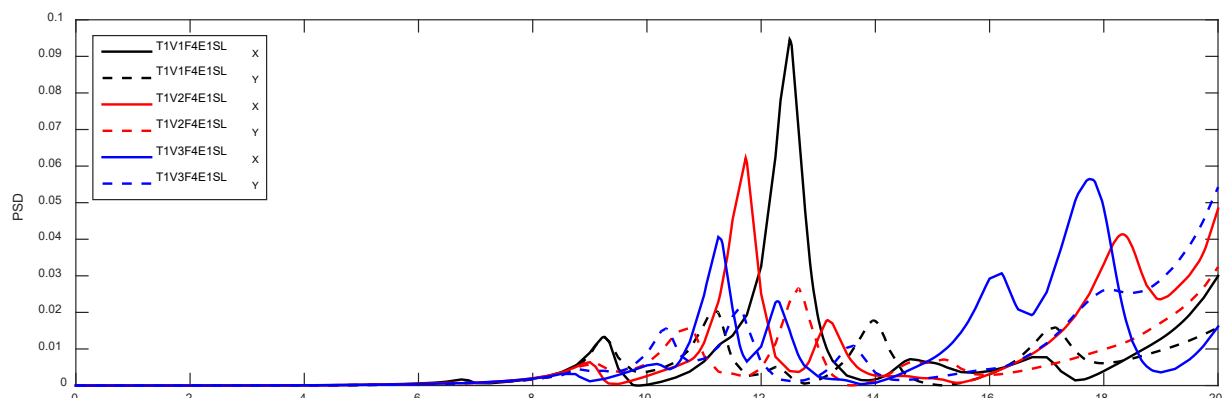


Fig 25-8: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F4 y sin lesiones

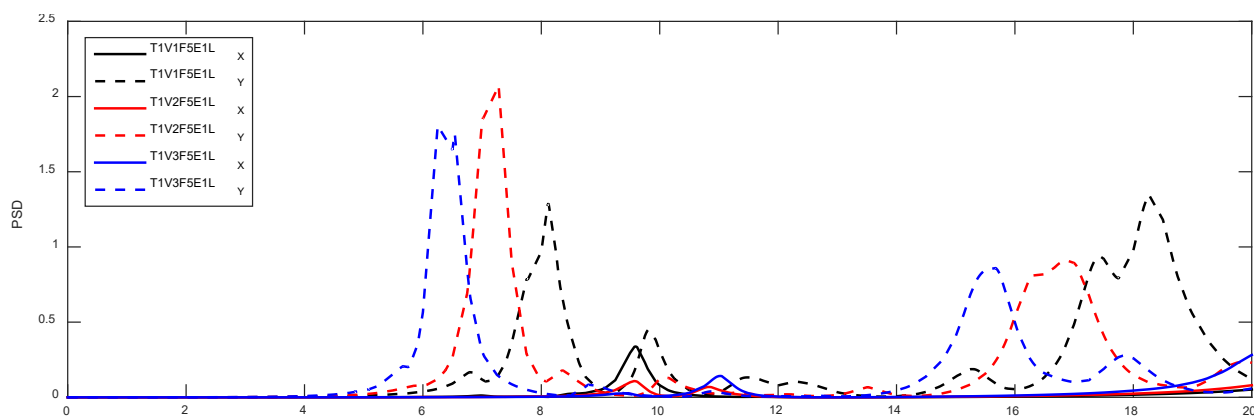


Fig 25-9: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1

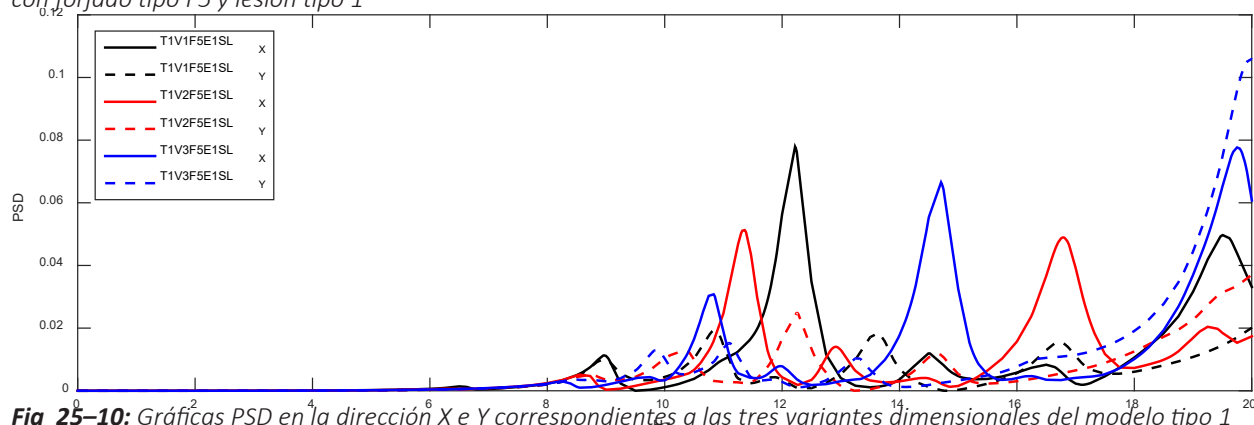


Fig 25-10: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F5 y sin lesiones

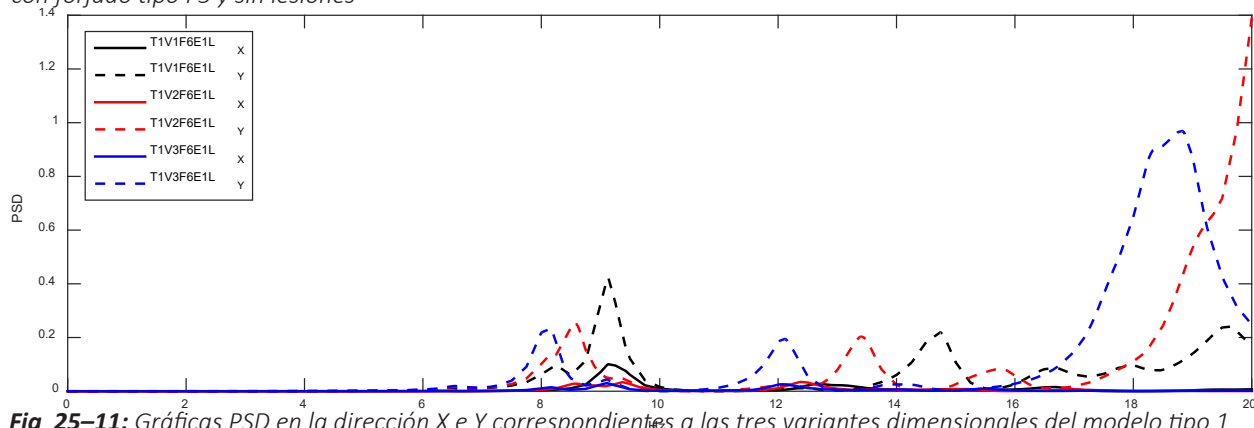


Fig 25-11: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1

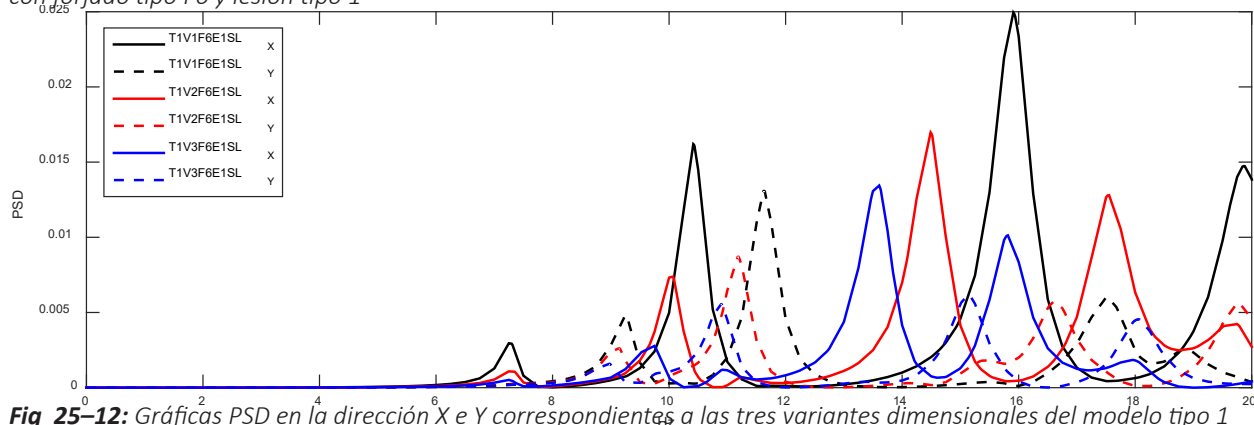


Fig 25-12: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F6 y sin lesiones

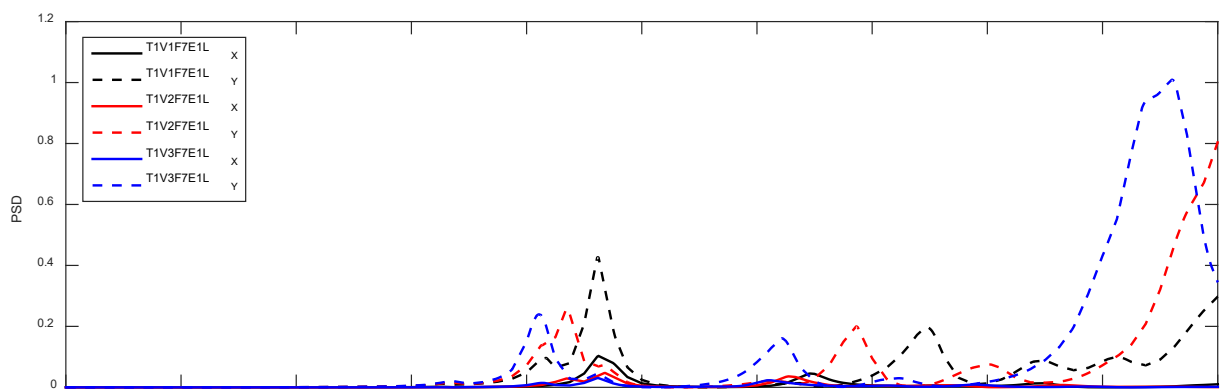


Fig 25-13: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1

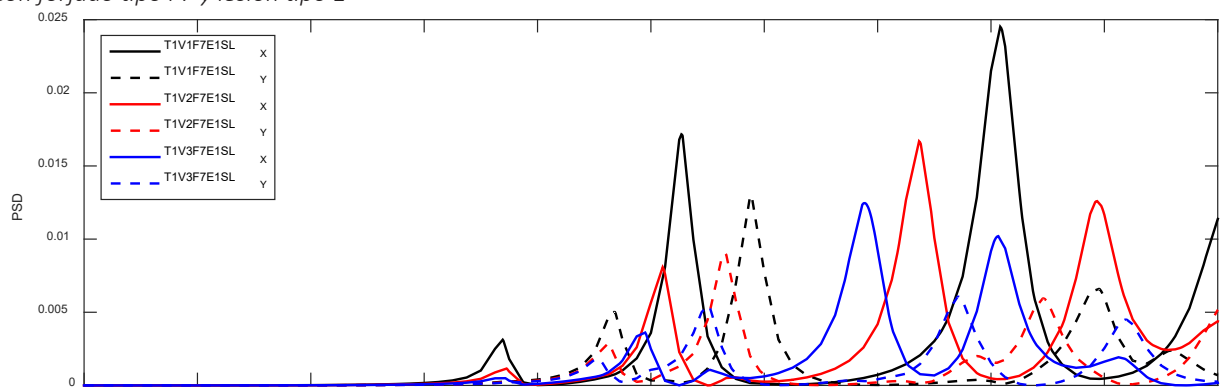


Fig 25-14: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F7 y sin lesiones

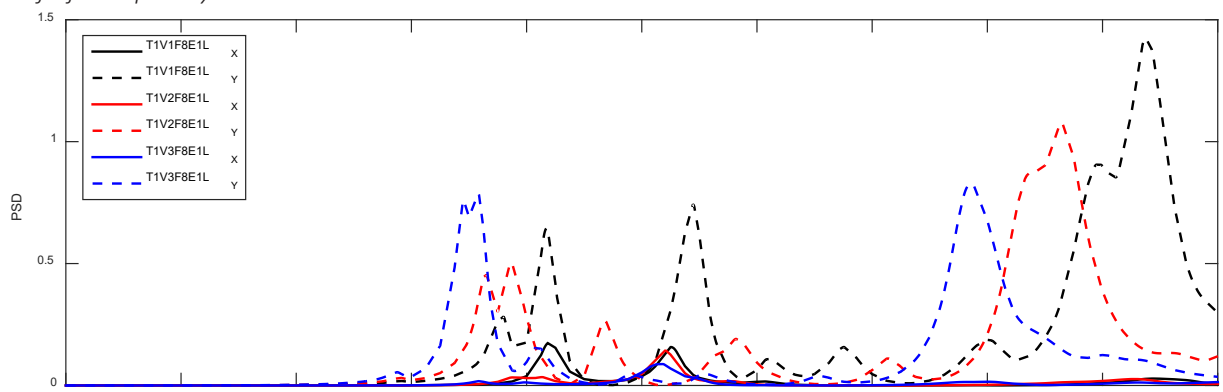


Fig 25-15: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1

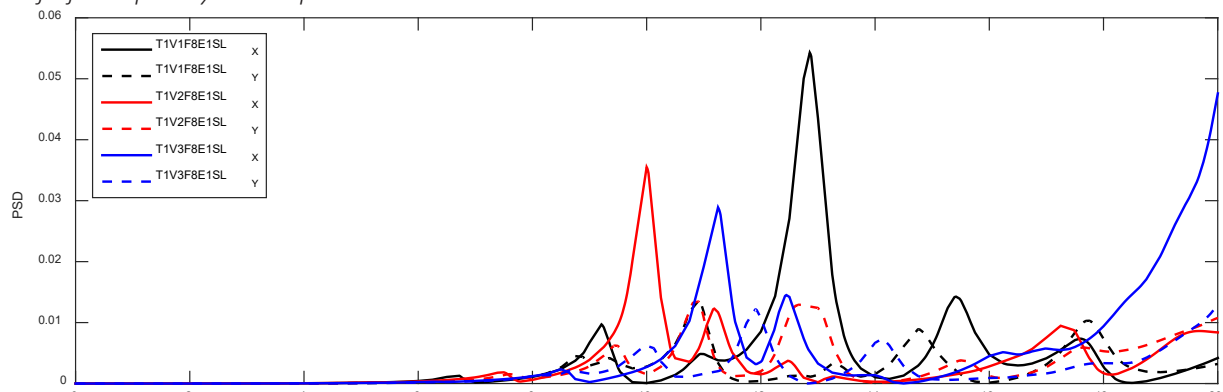


Fig 25-16: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F8 y sin lesiones

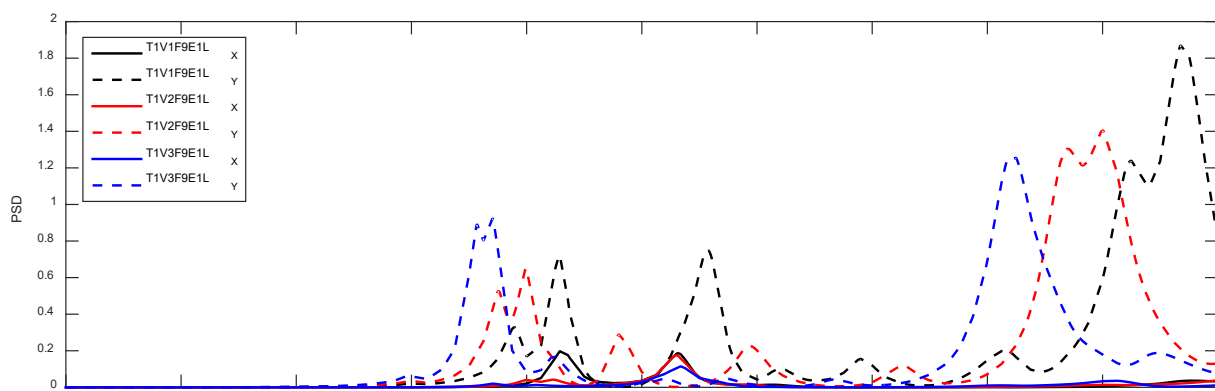


Fig 25-17: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1

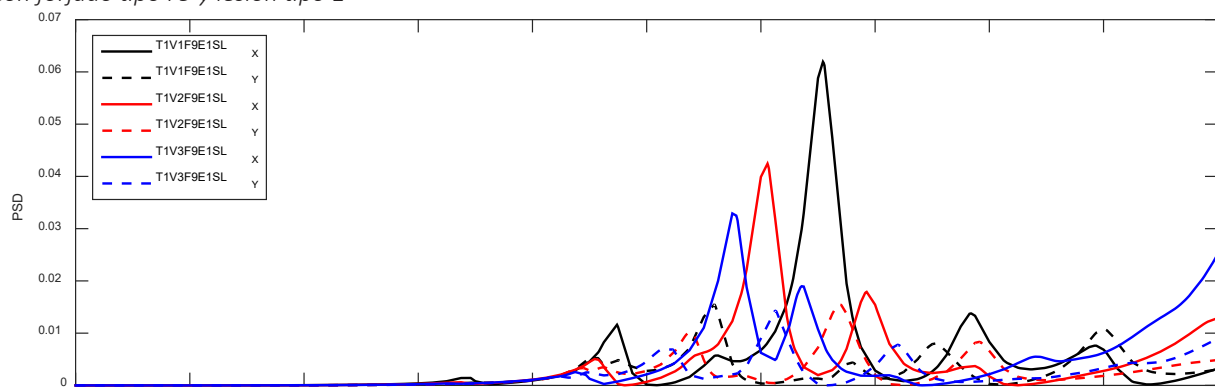


Fig 25-18: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 1 con forjado tipo F9 y sin lesiones

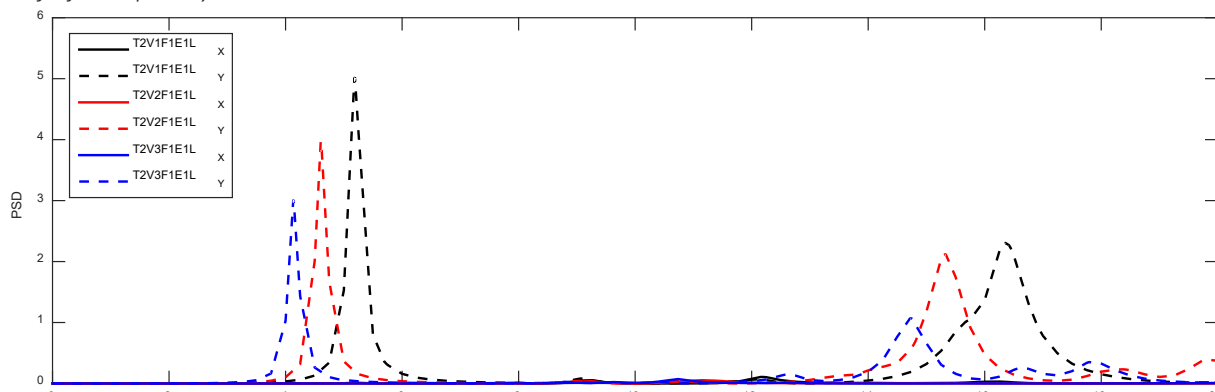


Fig 25-19: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1

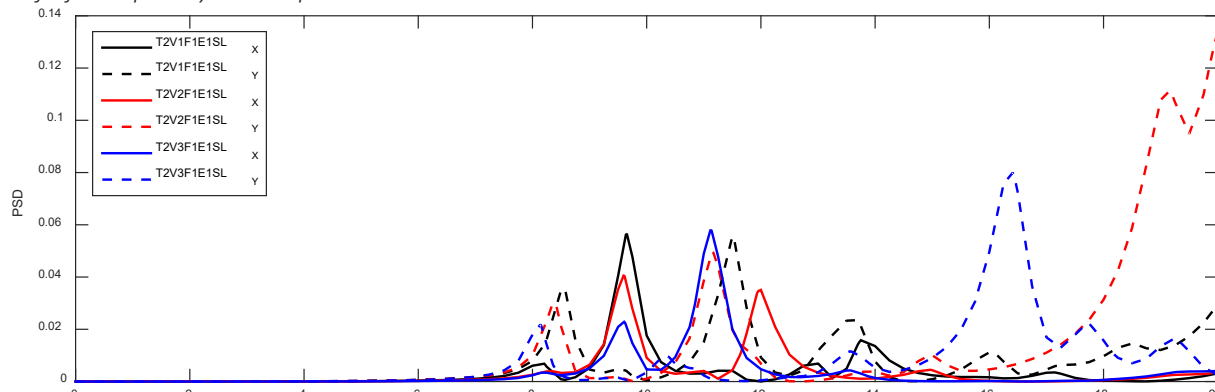


Fig 25-20: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F1 y sin lesiones

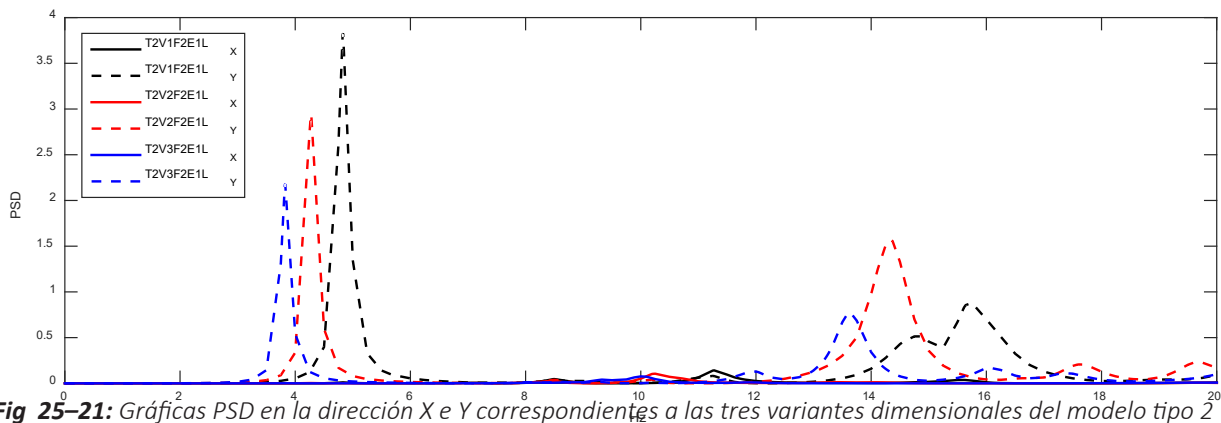


Fig 25-21: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1

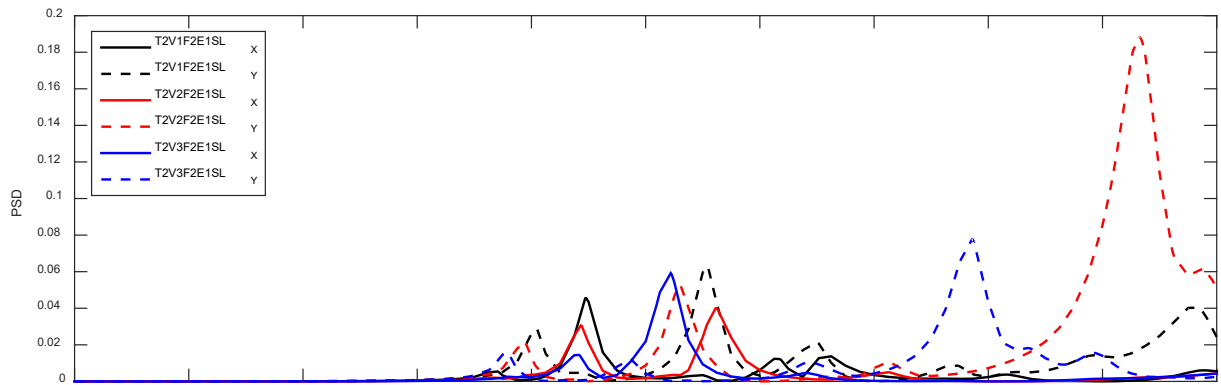


Fig 25-22: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F2 y sin lesiones

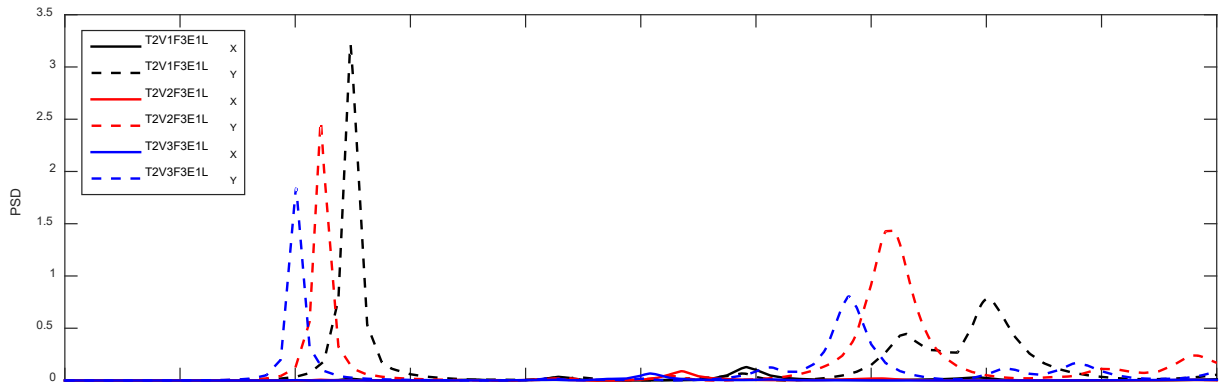


Fig 25-23: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1

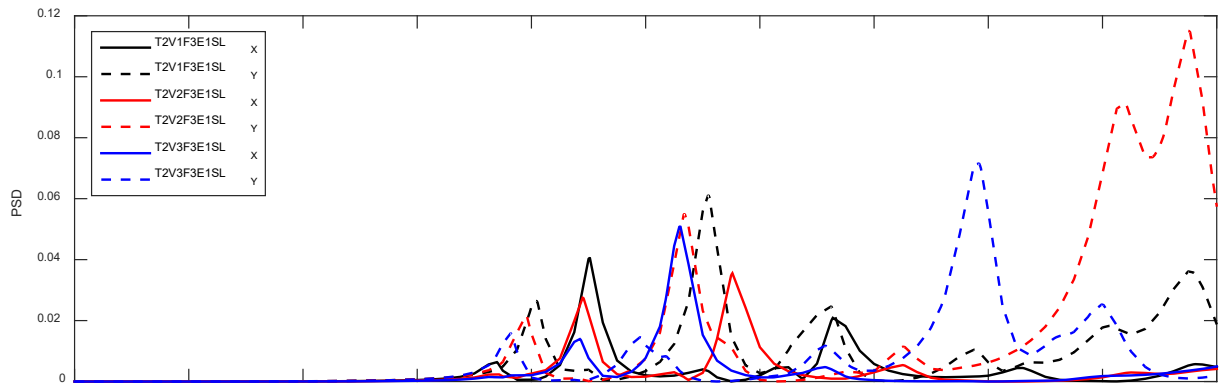


Fig 25-24: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F3 y sin lesiones

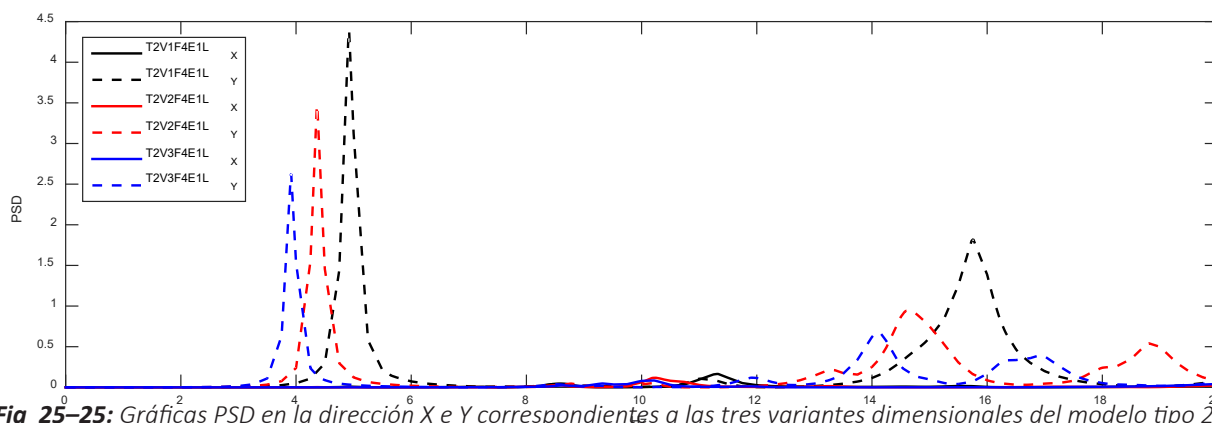


Fig 25-25: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1

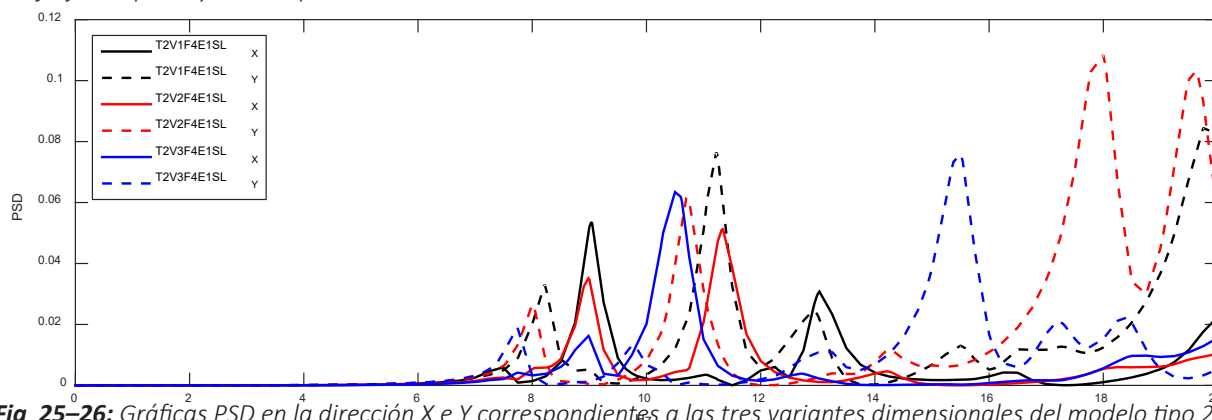


Fig 25-26: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F4 y sin lesiones

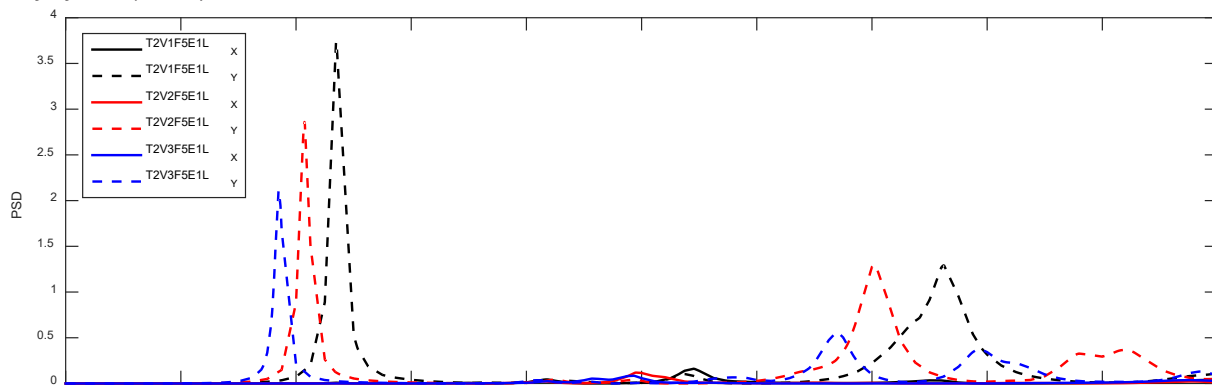


Fig 25-27: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1

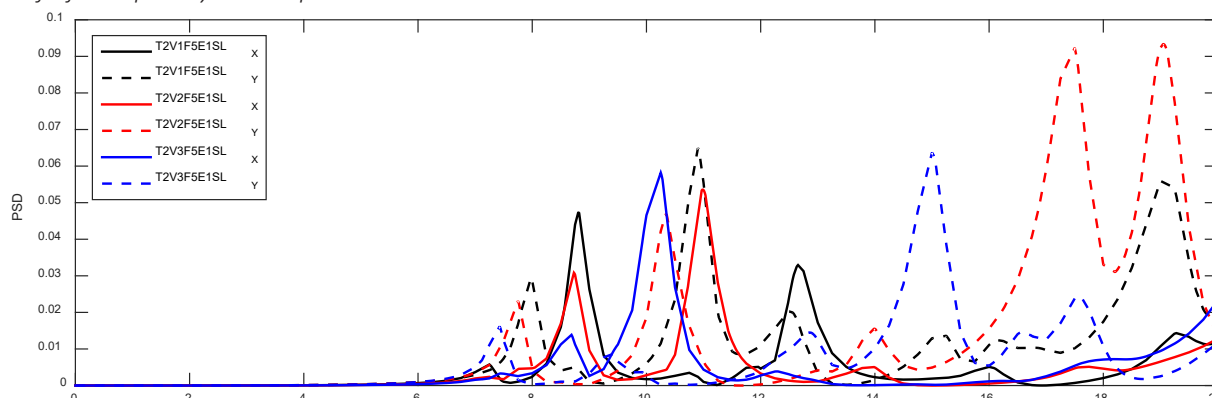


Fig 25-28: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F5 y sin lesiones

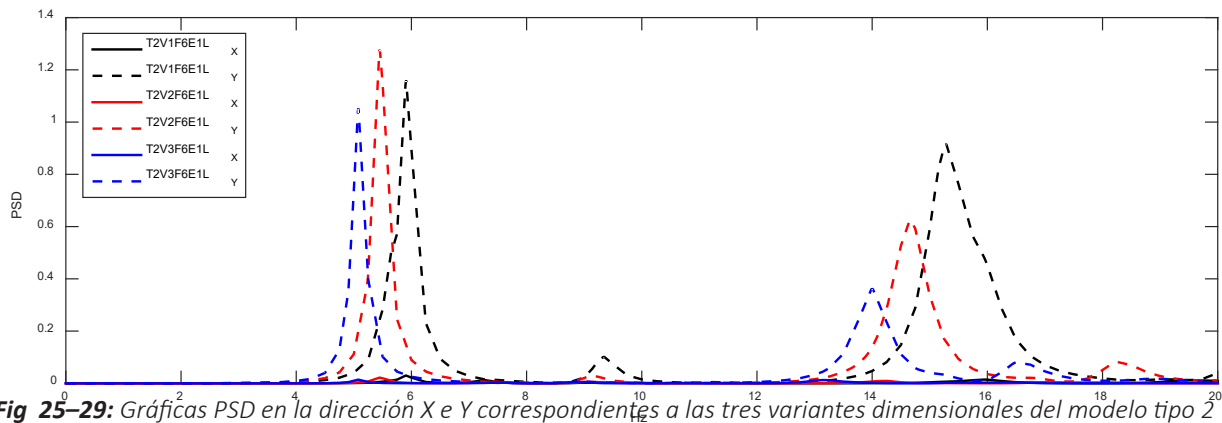


Fig 25-29: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1

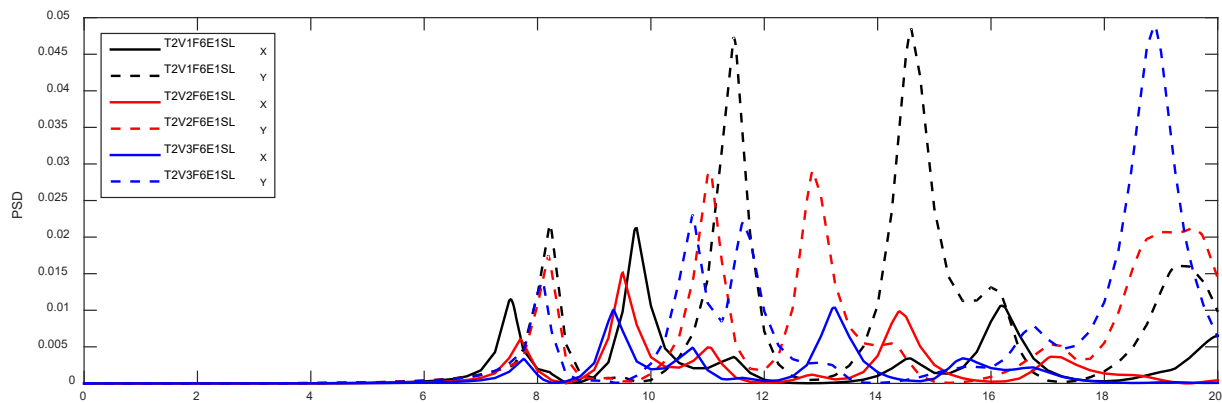


Fig 25-30: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F6 y sin lesiones

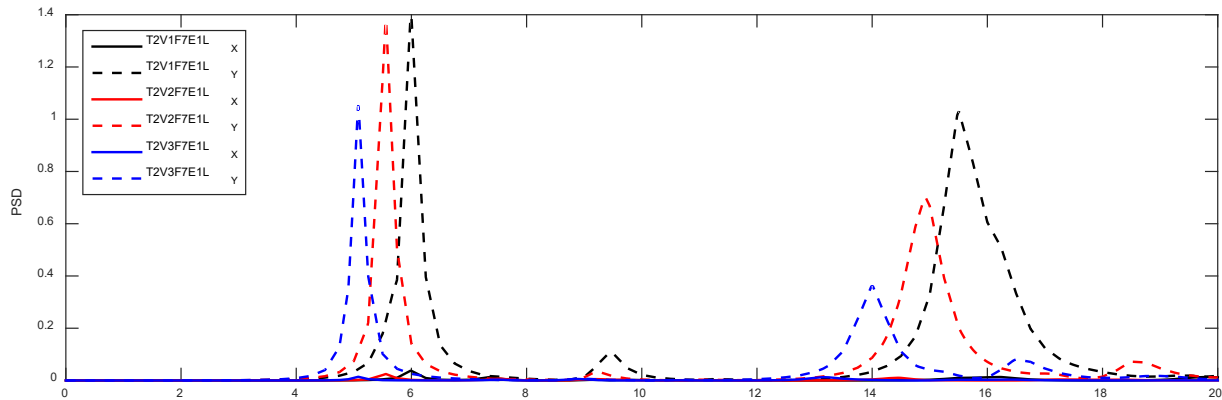


Fig 25-31: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1

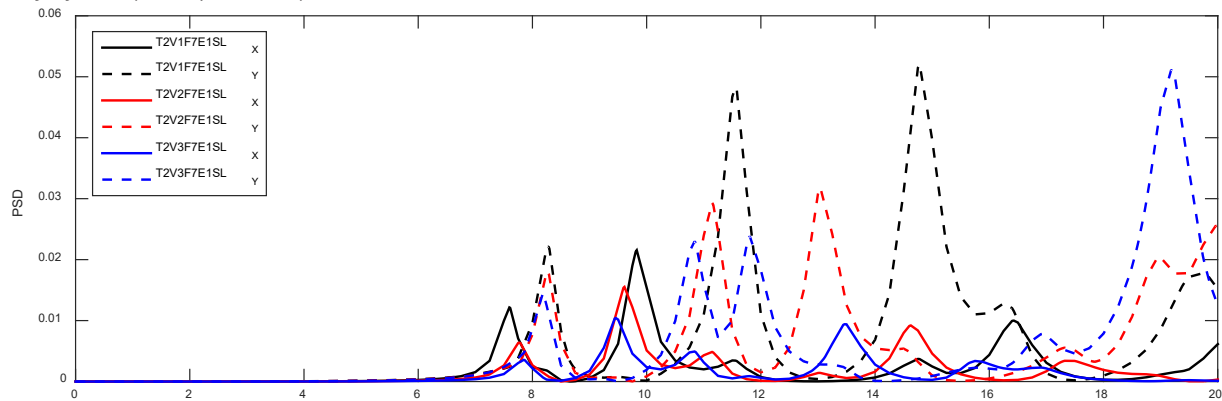


Fig 25-32: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F7 y sin lesiones

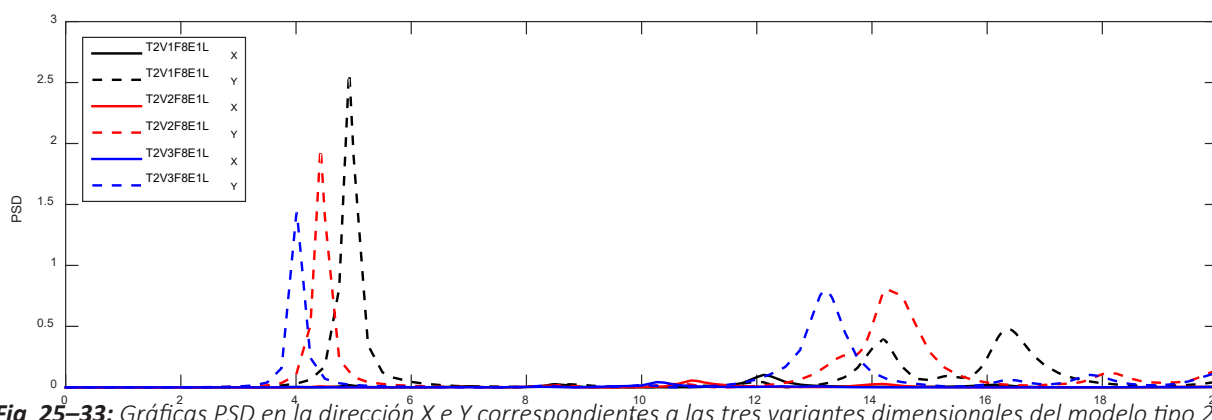


Fig 25-33: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1

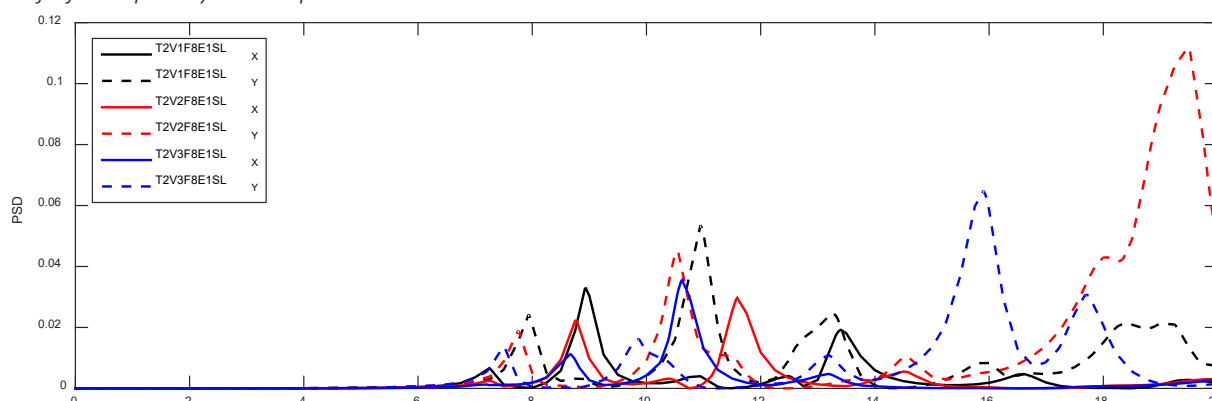


Fig 25-34: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F8 y sin lesiones

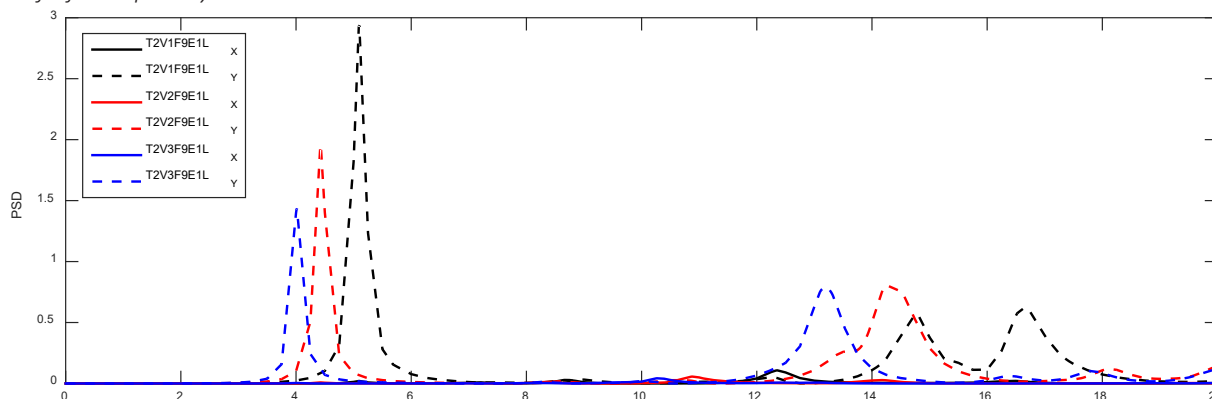


Fig 25-35: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1

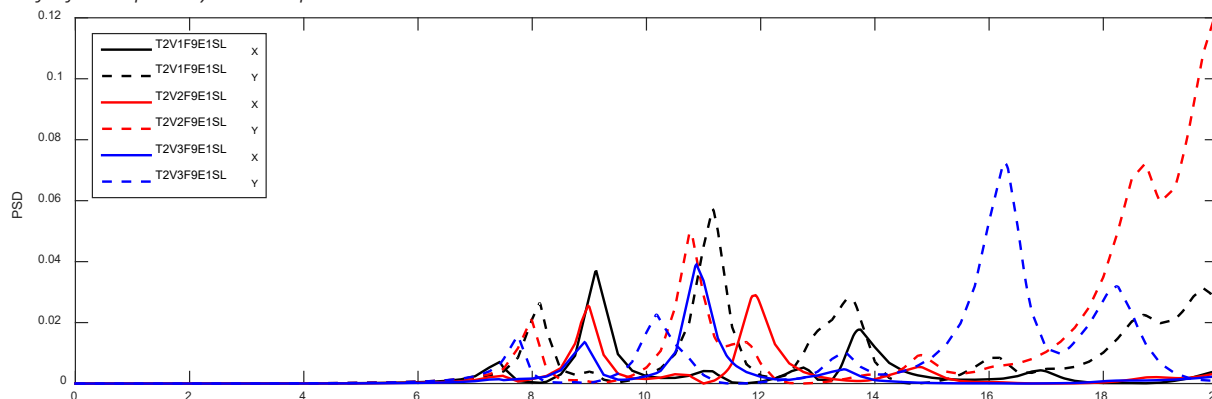


Fig 25-36: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 2 con forjado tipo F9 y sin lesiones

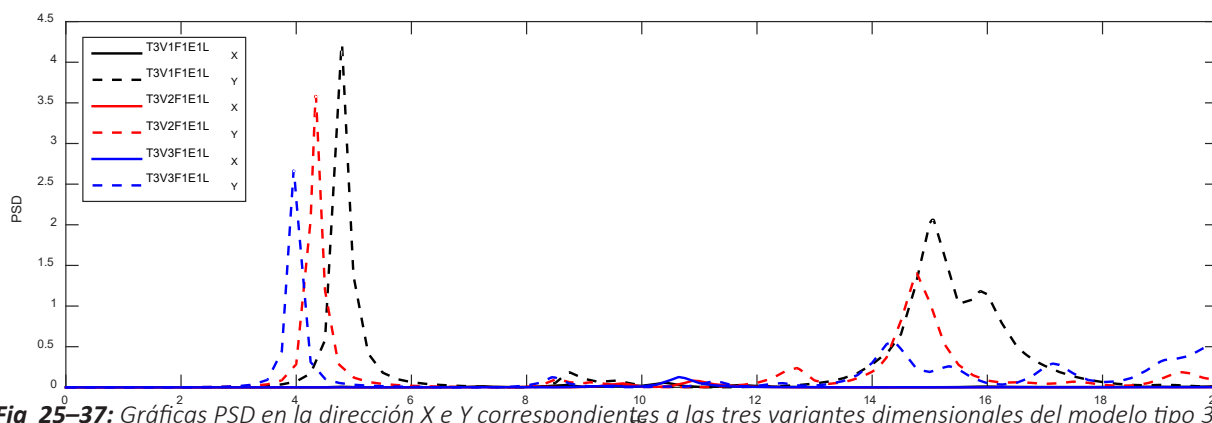


Fig 25-37: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1

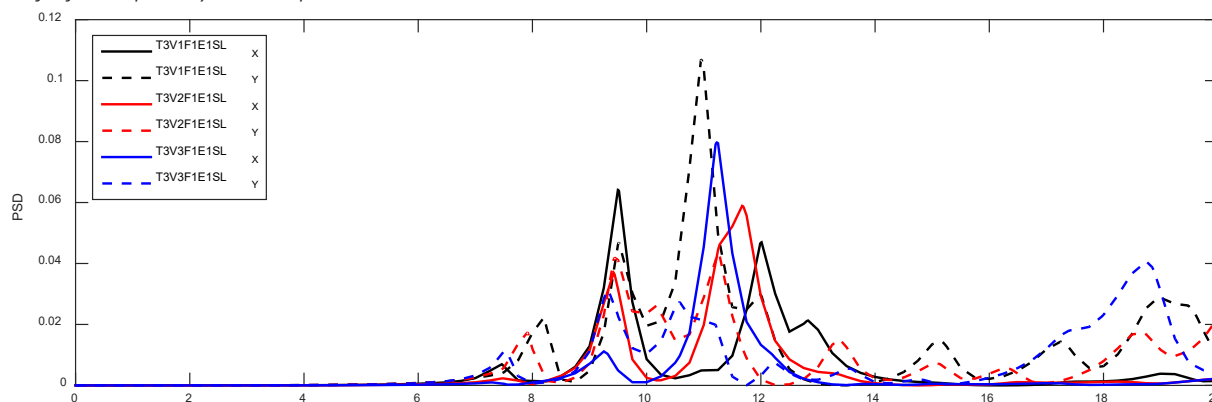


Fig 25-38: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F1 y sin lesiones

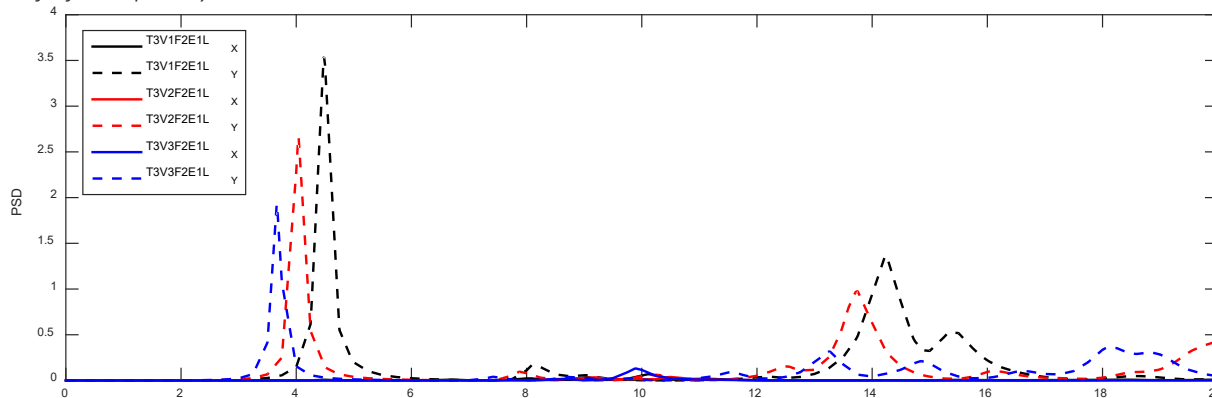


Fig 25-39: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1

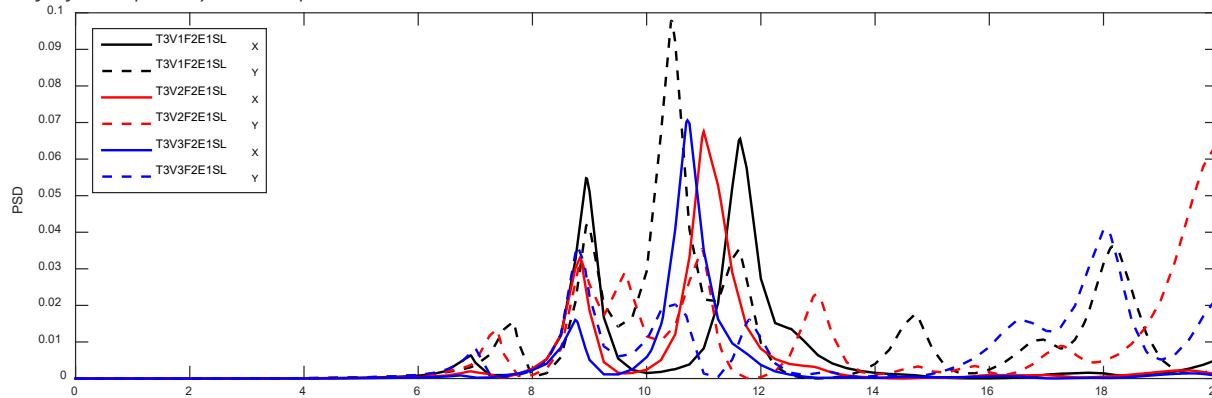


Fig 25-40: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F2 y sin lesiones

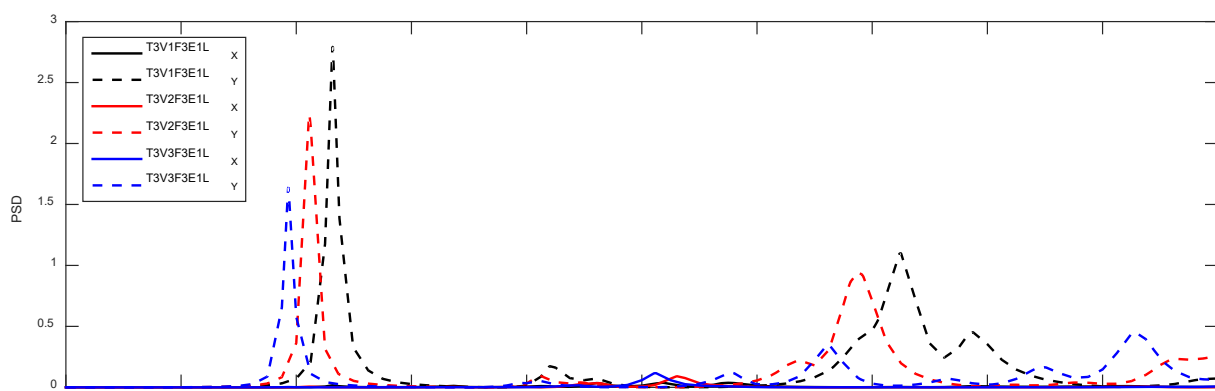


Fig 25-41: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1

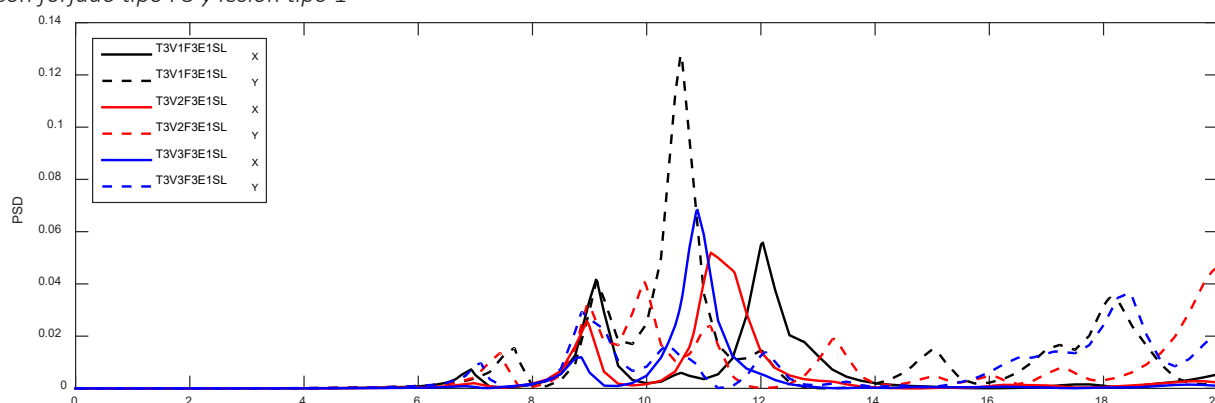


Fig 25-42: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F3 y sin lesiones

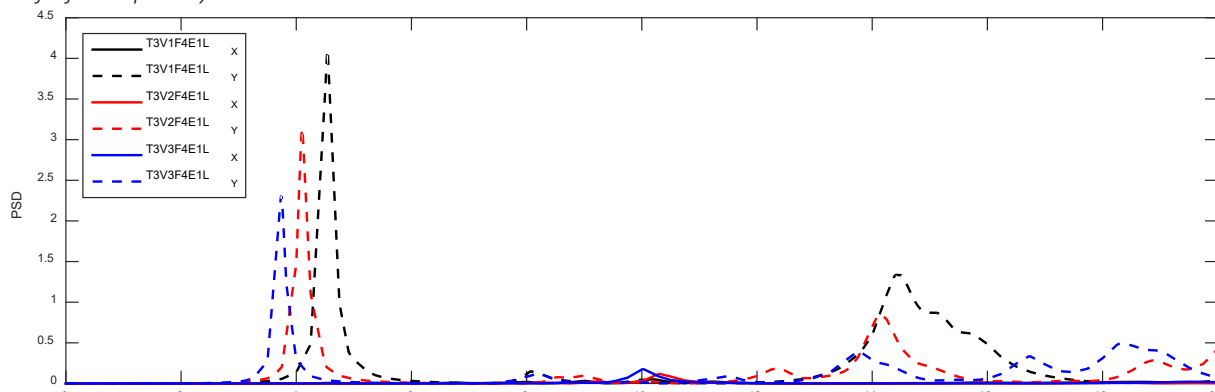


Fig 25-43: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1

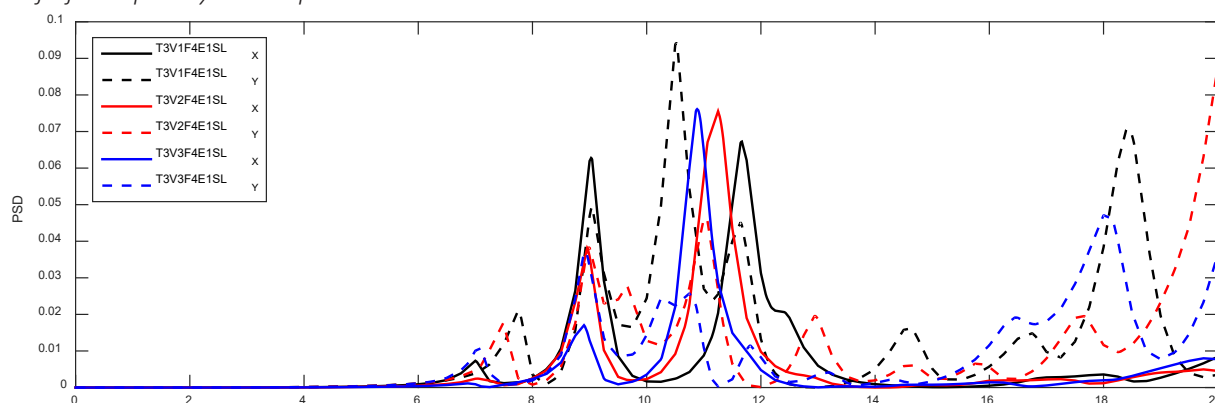


Fig 25-44: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F4 y sin lesiones

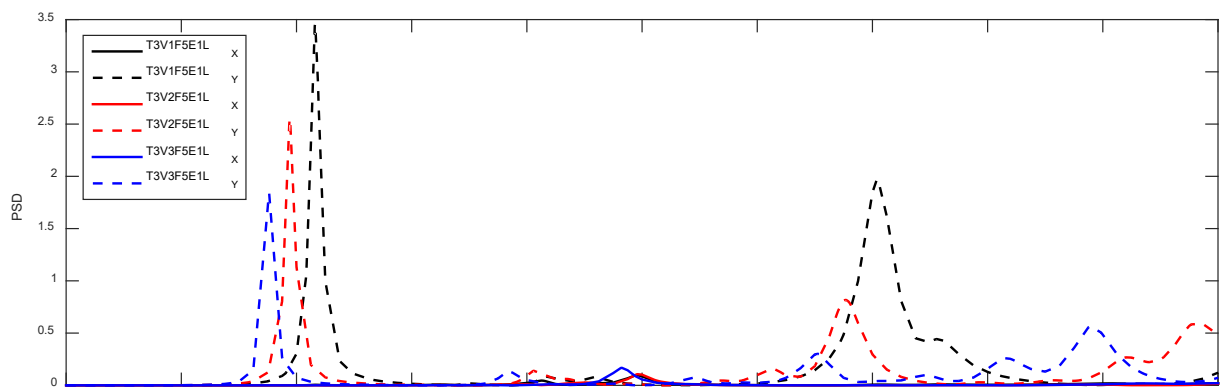


Fig 25-45: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1

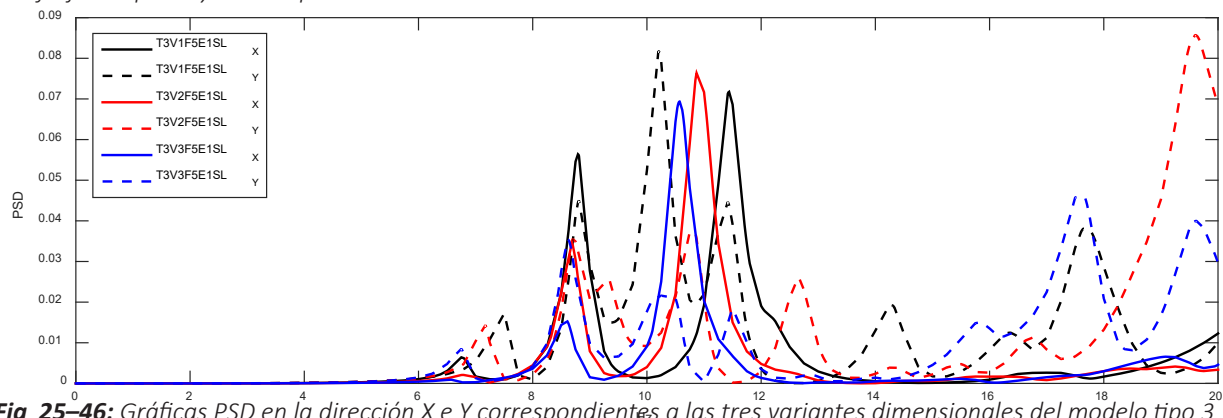


Fig 25-46: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F5 y sin lesiones

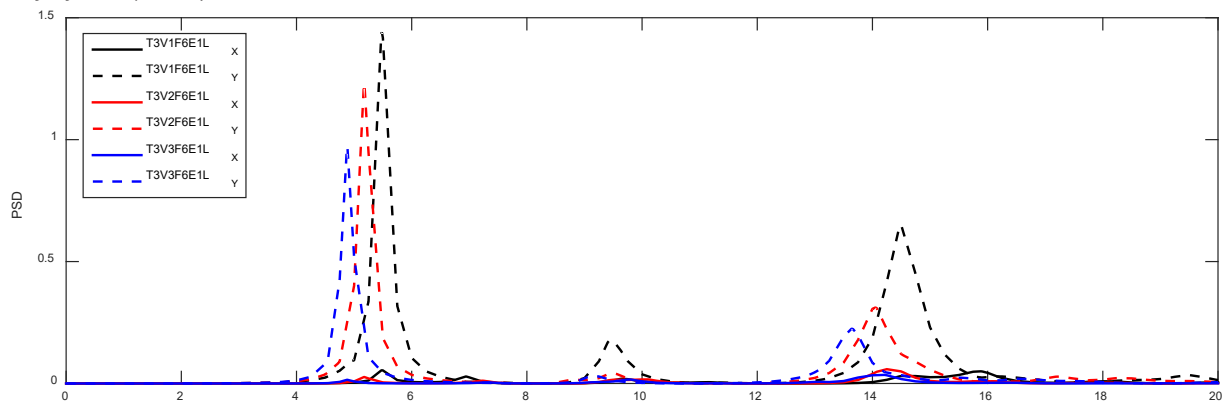


Fig 25-47: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1

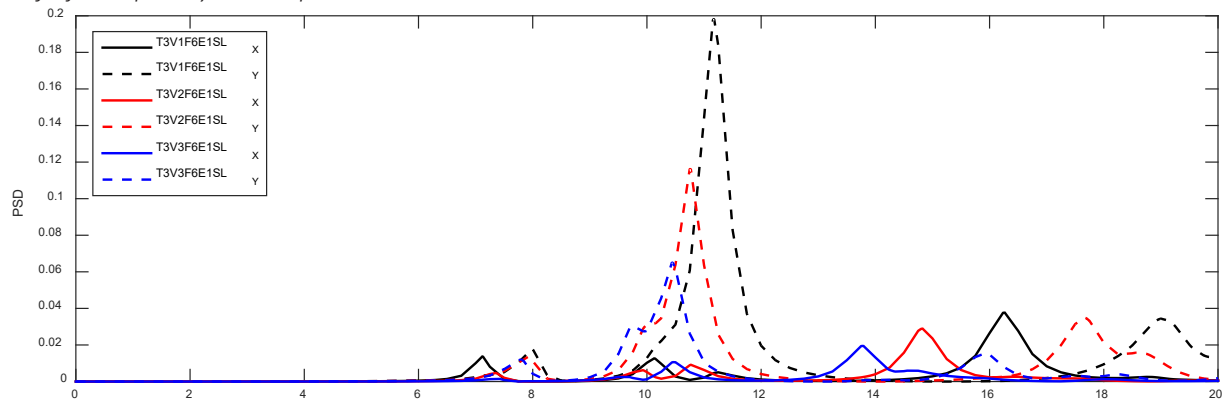


Fig 25-48: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F6 y sin lesiones

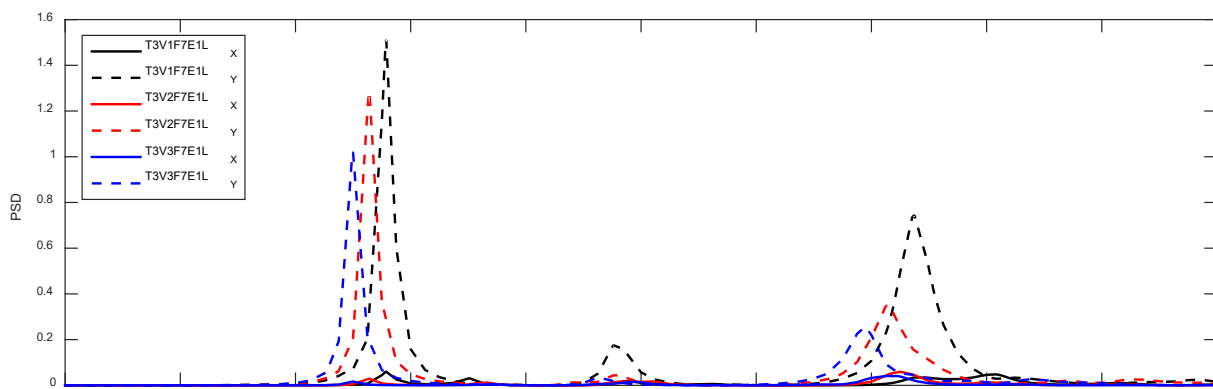


Fig 25-49: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1

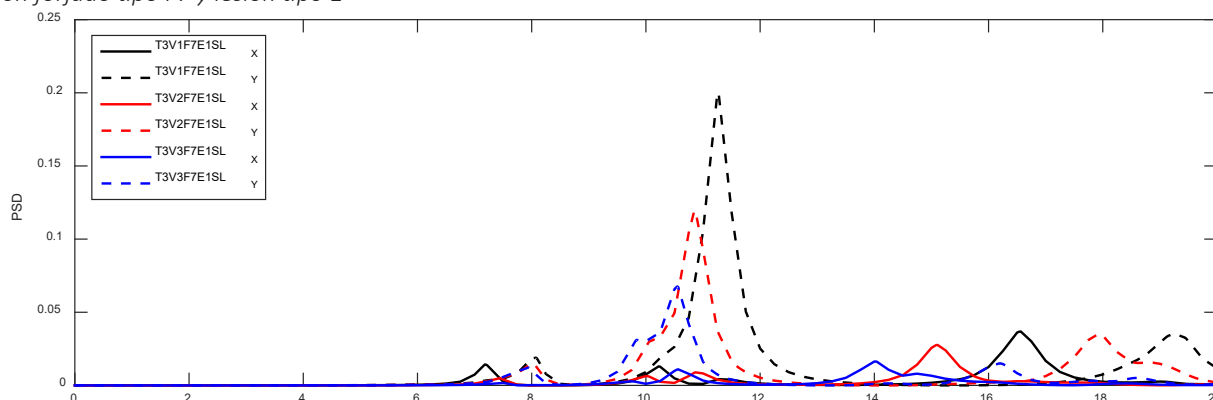


Fig 25-50: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F7 y sin lesiones

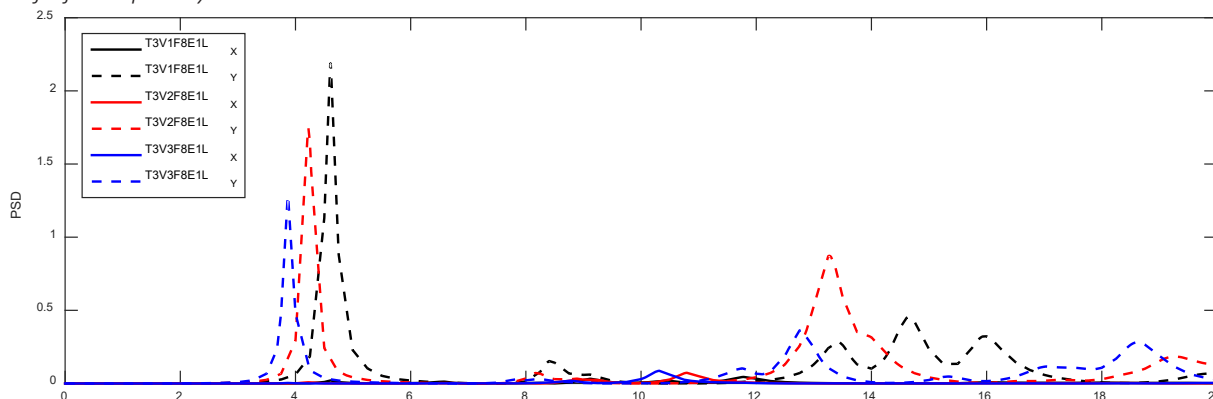


Fig 25-51: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1

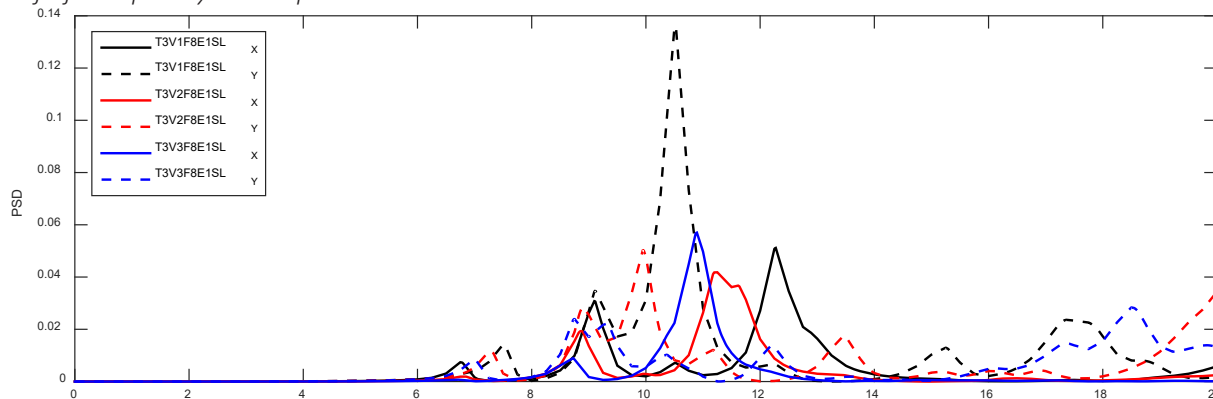


Fig 25-52: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F8 y sin lesiones

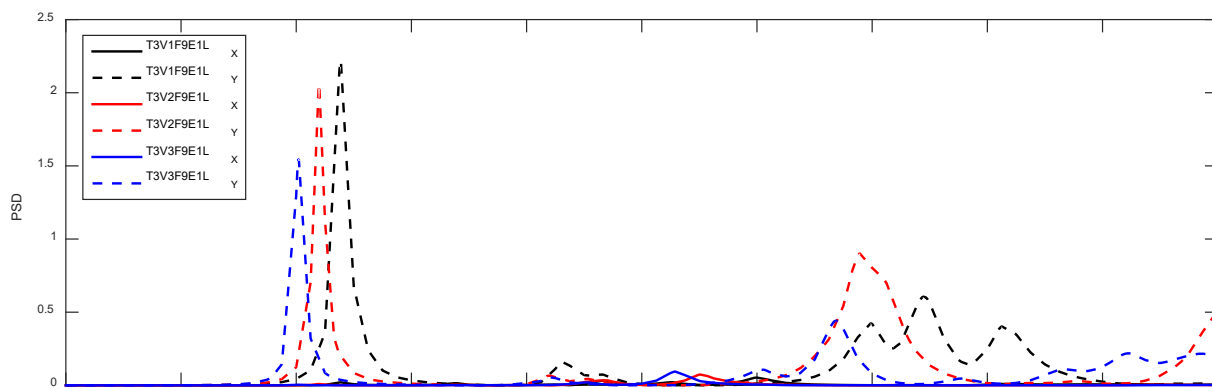


Fig 25-53: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1

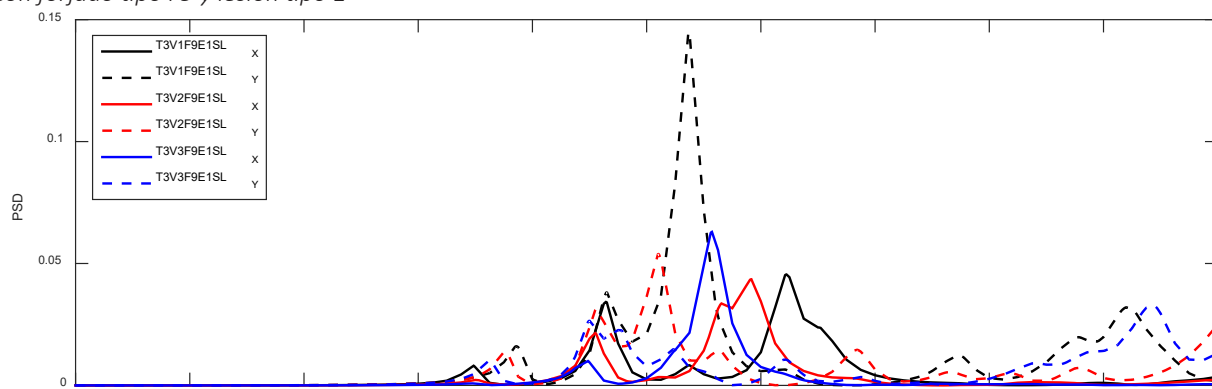


Fig 25-54: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 3 con forjado tipo F9 y sin lesiones

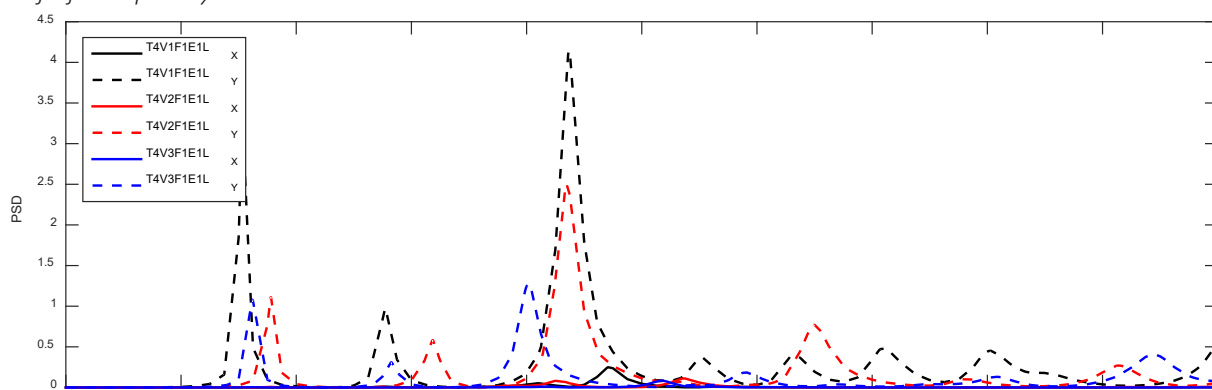


Fig 25-55: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1

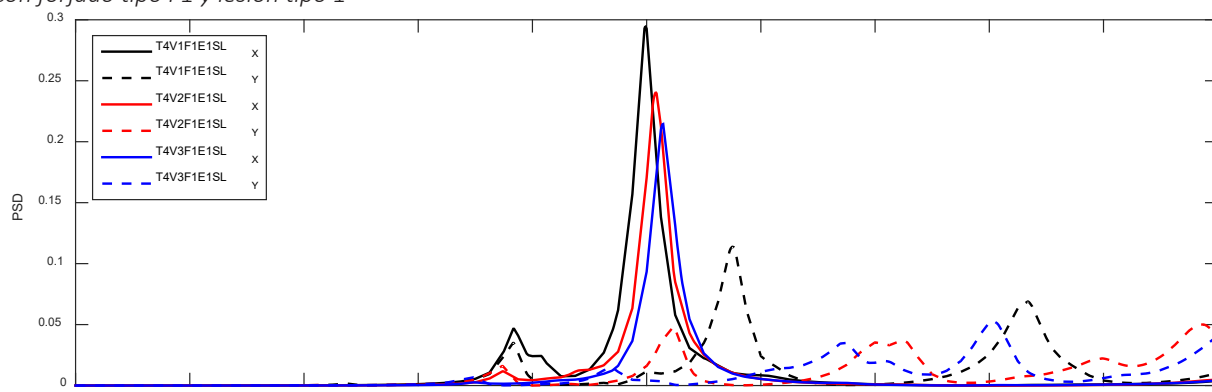


Fig 25-56: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F1 y sin lesiones

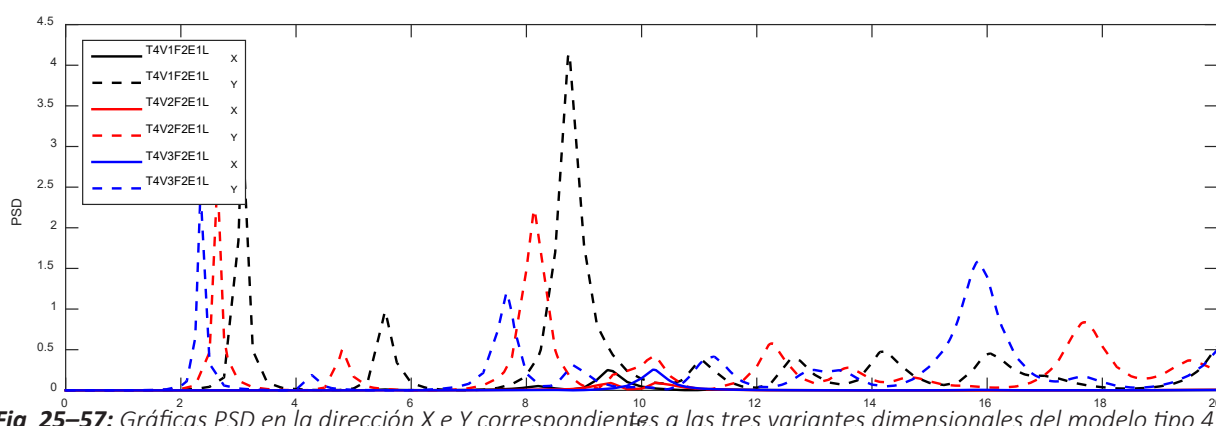


Fig 25-57: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1

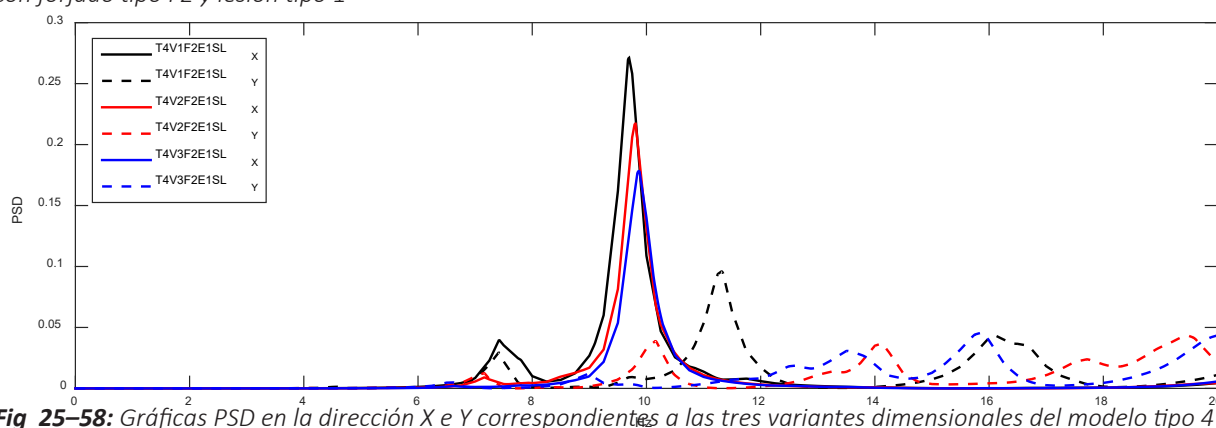


Fig 25-58: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F2 y sin lesiones

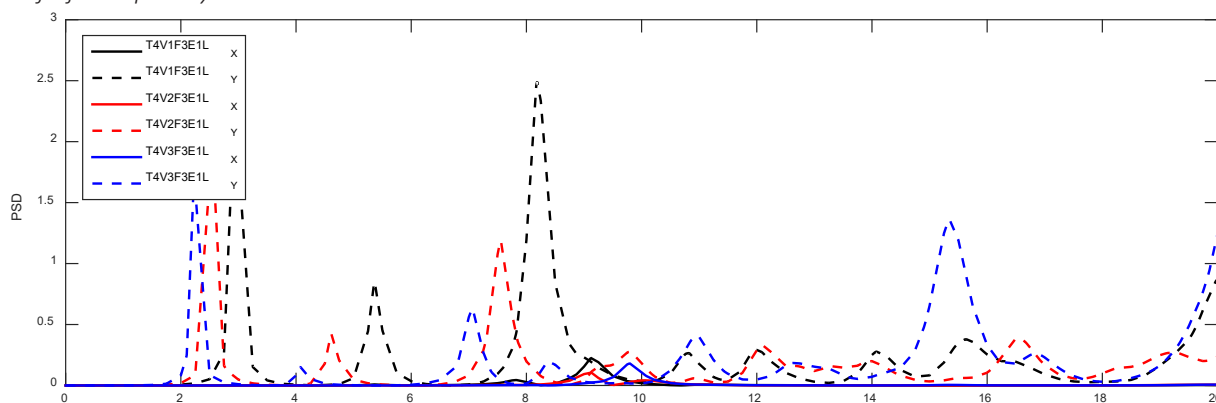


Fig 25-59: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1

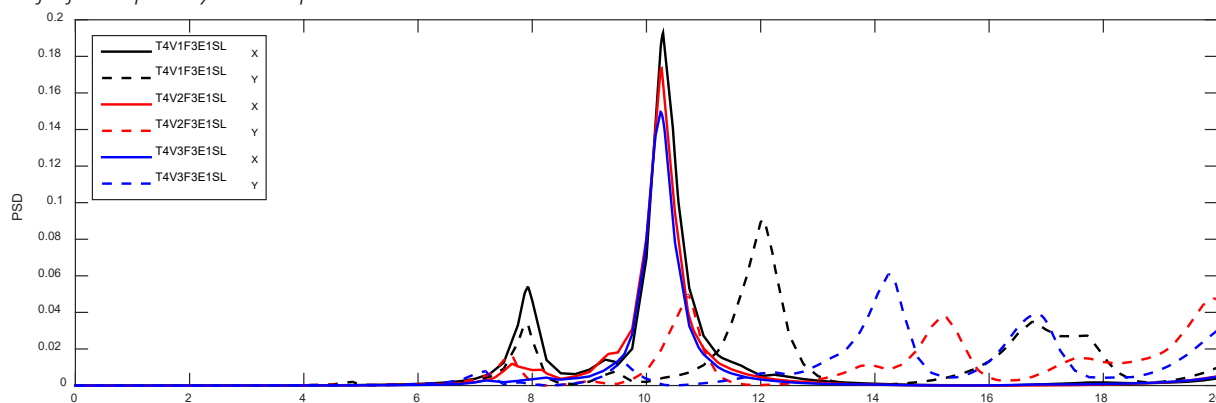


Fig 25-60: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F3 y sin lesiones

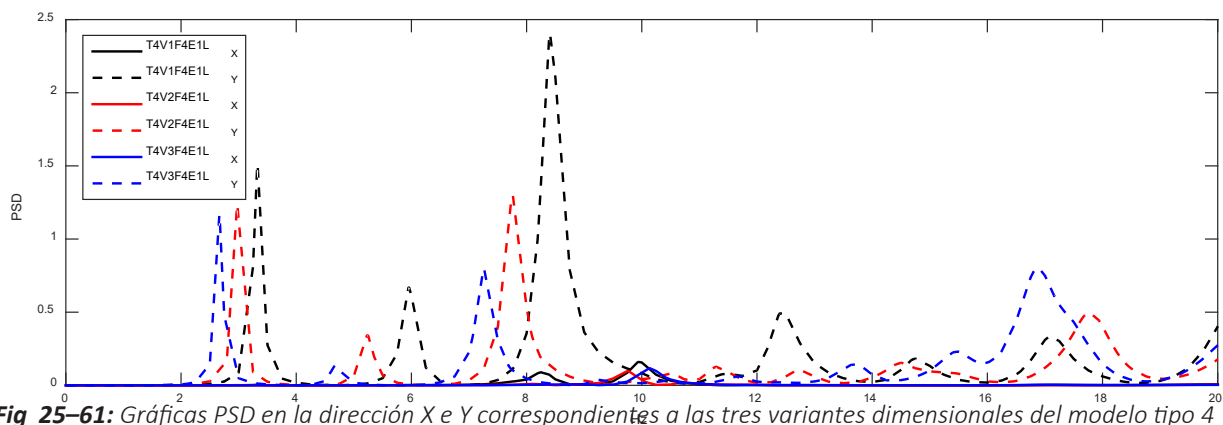


Fig 25-61: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1

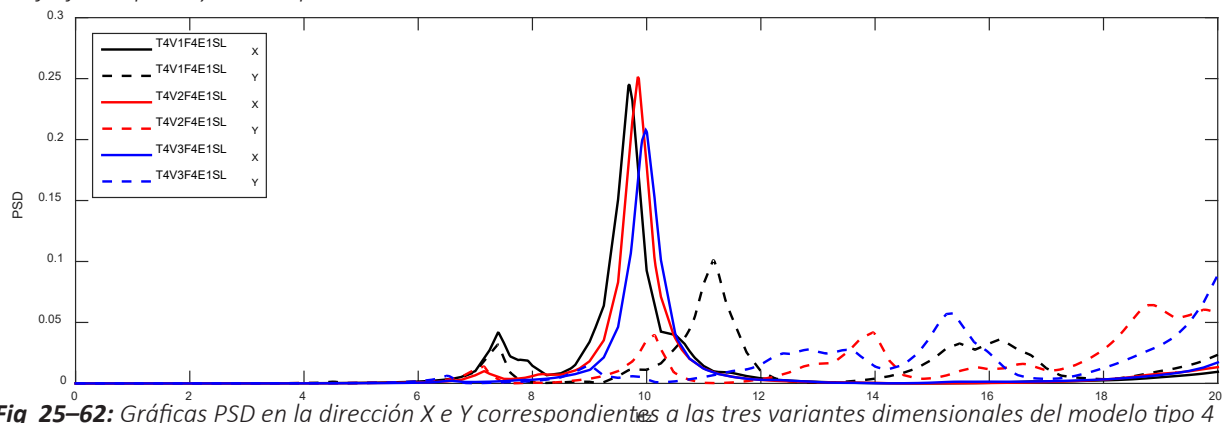


Fig 25-62: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F4 y sin lesiones

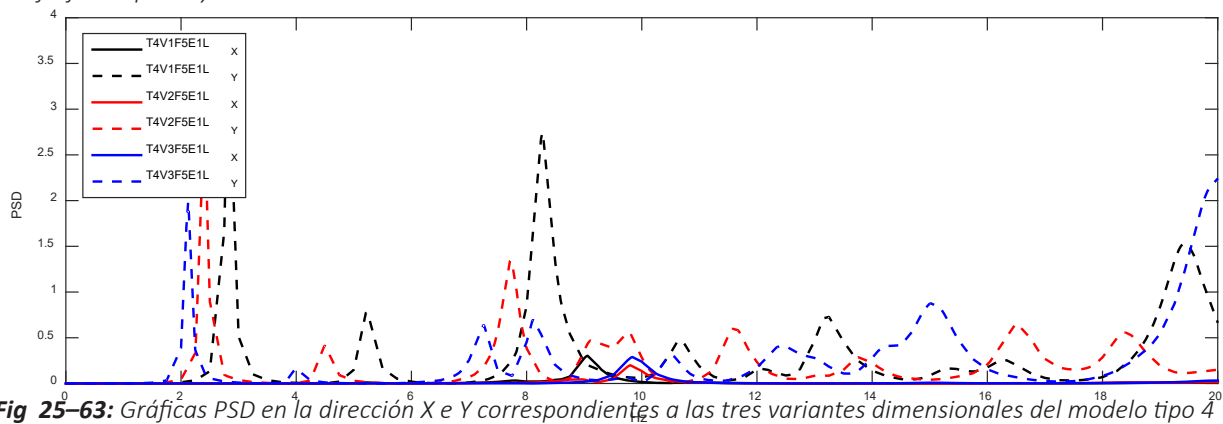


Fig 25-63: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1

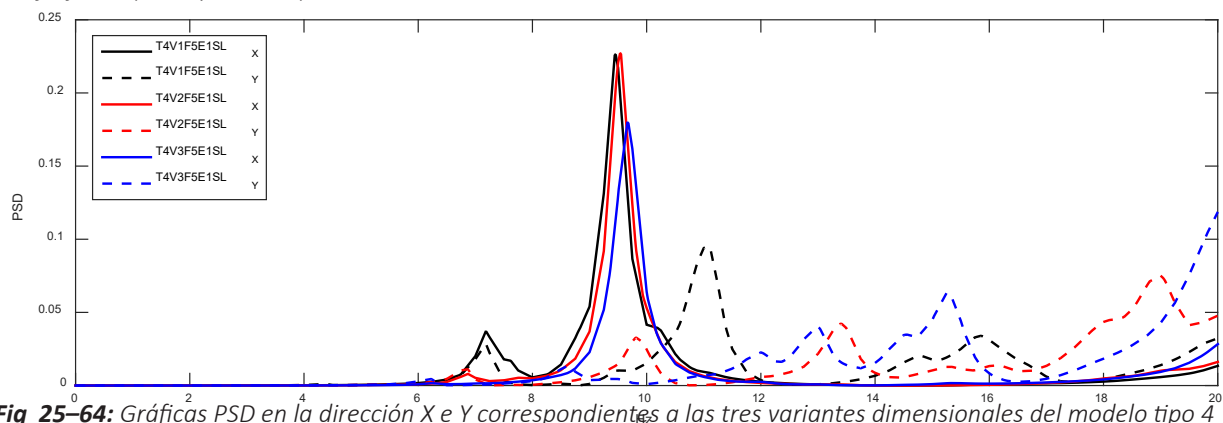


Fig 25-64: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F5 y sin lesiones

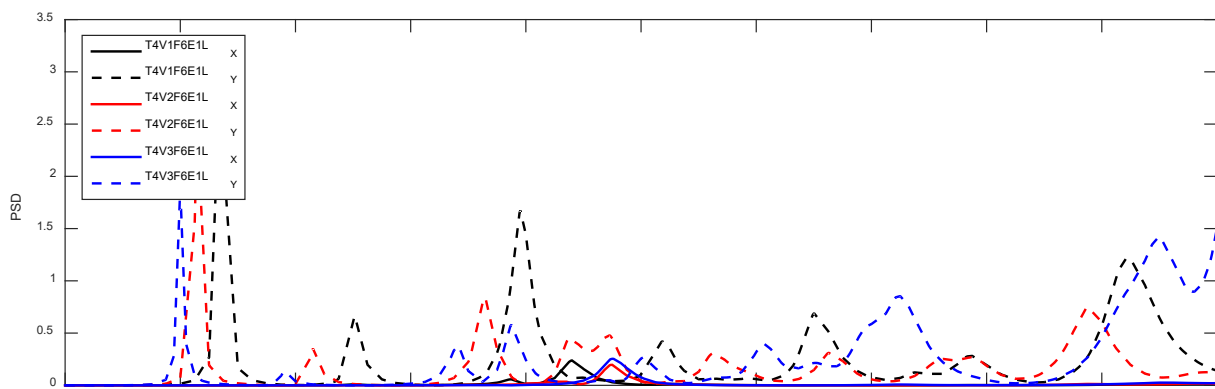


Fig 25-65: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1

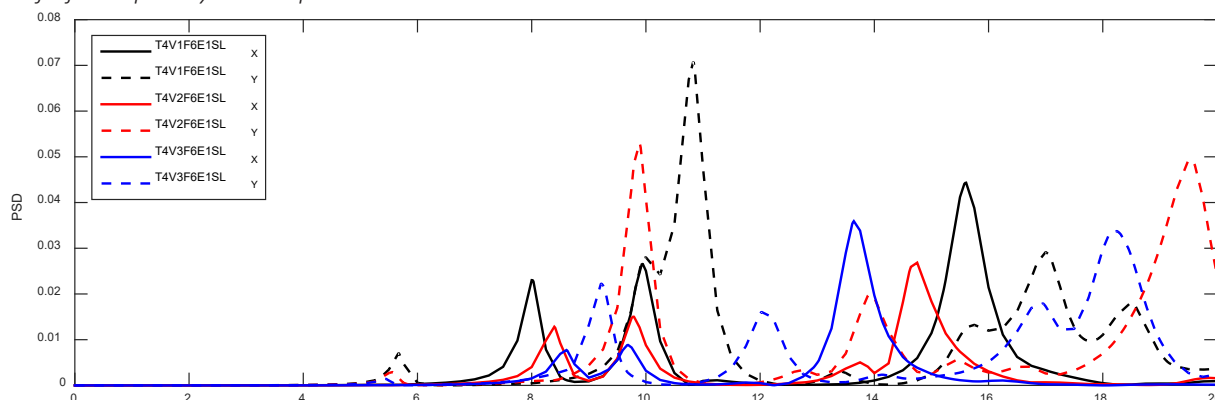


Fig 25-66: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F6 y sin lesiones

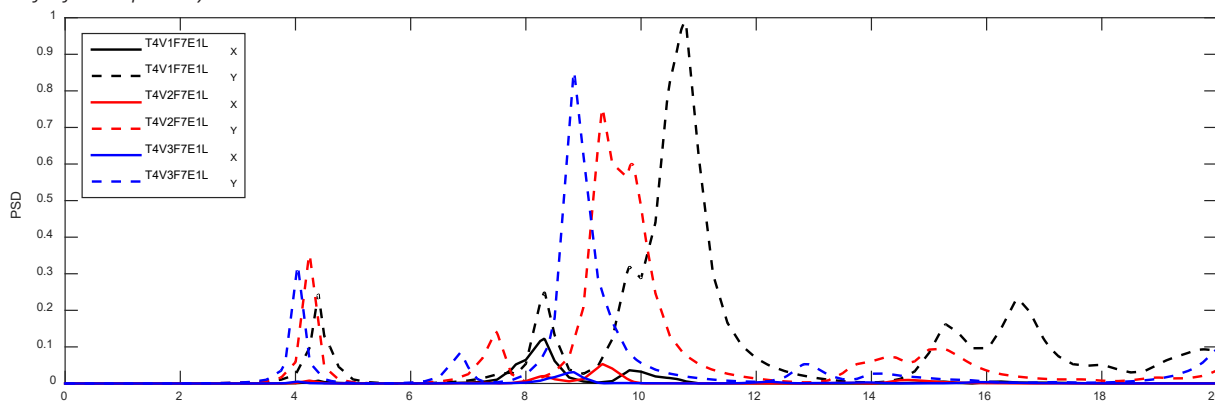


Fig 25-67: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1

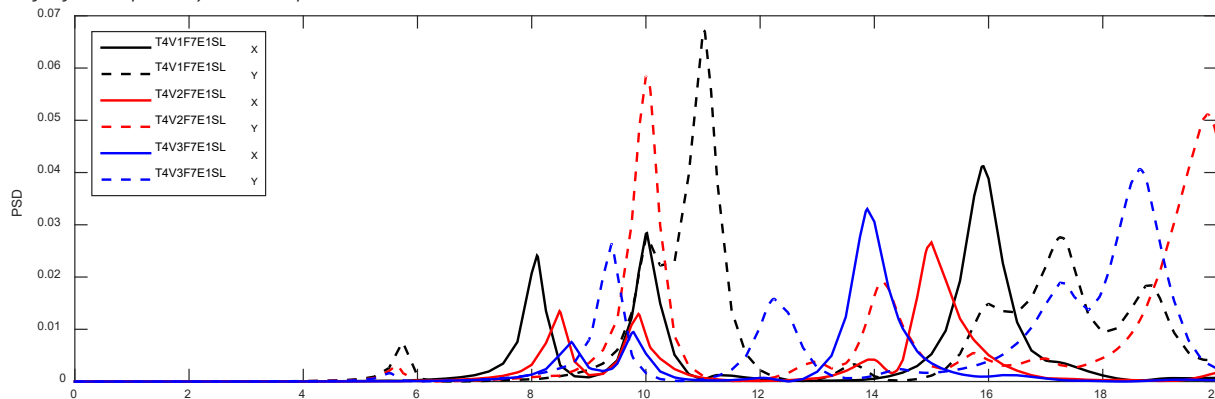


Fig 25-68: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F7 y sin lesiones

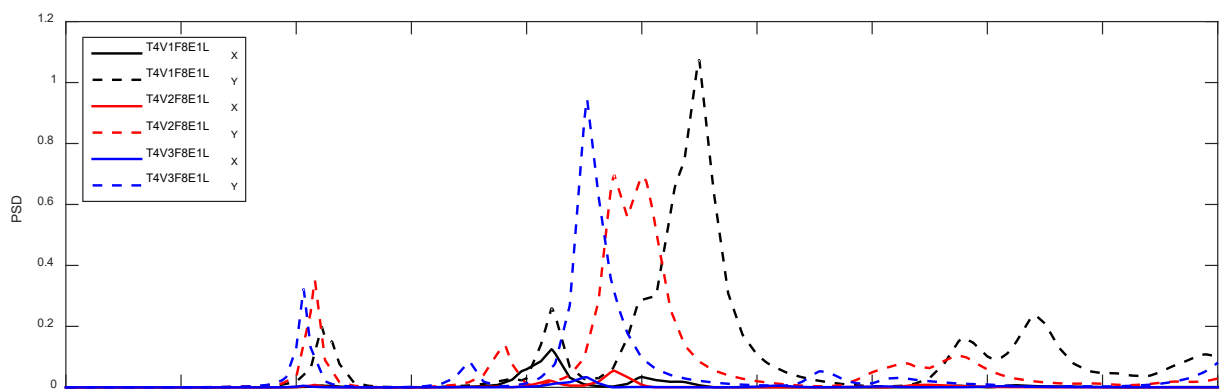


Fig 25-69: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1

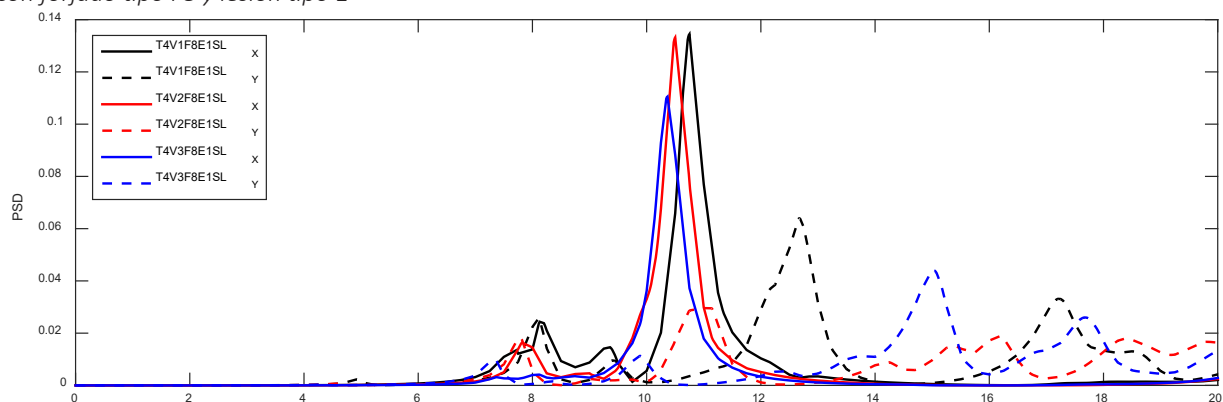


Fig 25-70: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F8 y sin lesiones

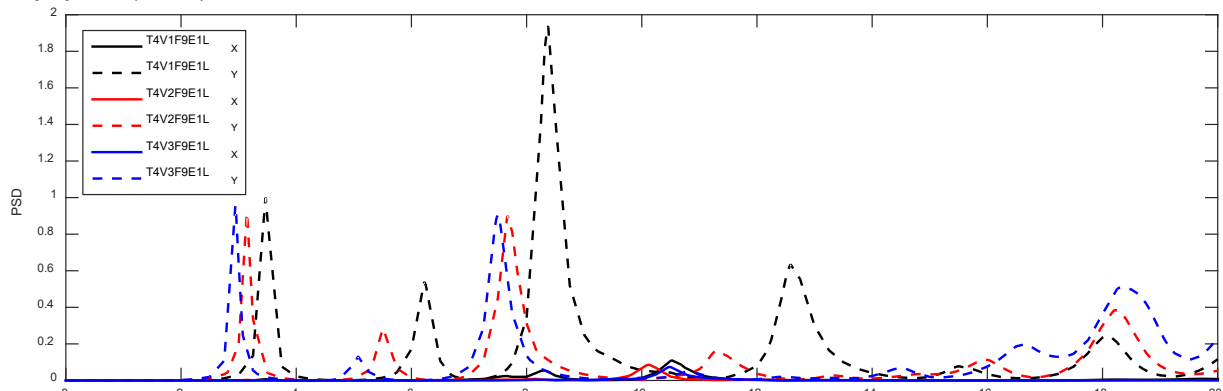


Fig 25-71: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1

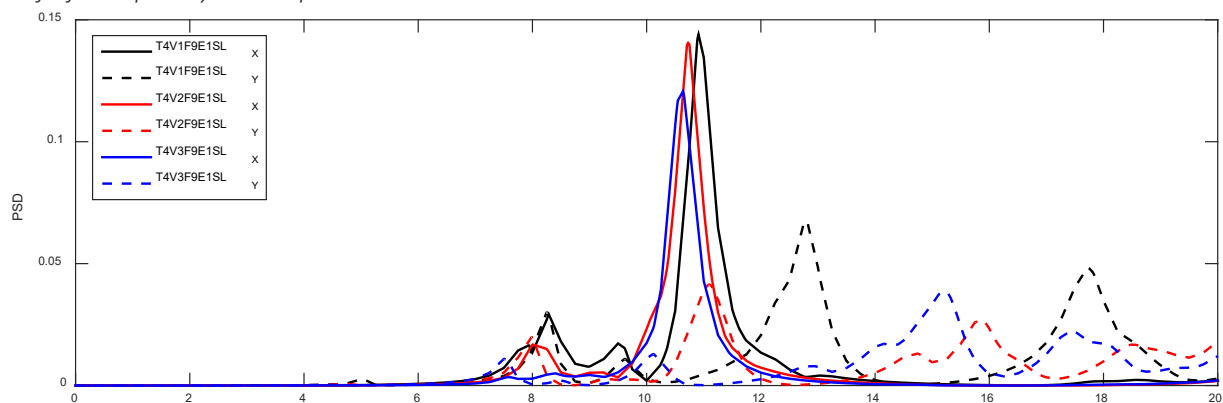


Fig 25-72: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 4 con forjado tipo F9 y sin lesiones

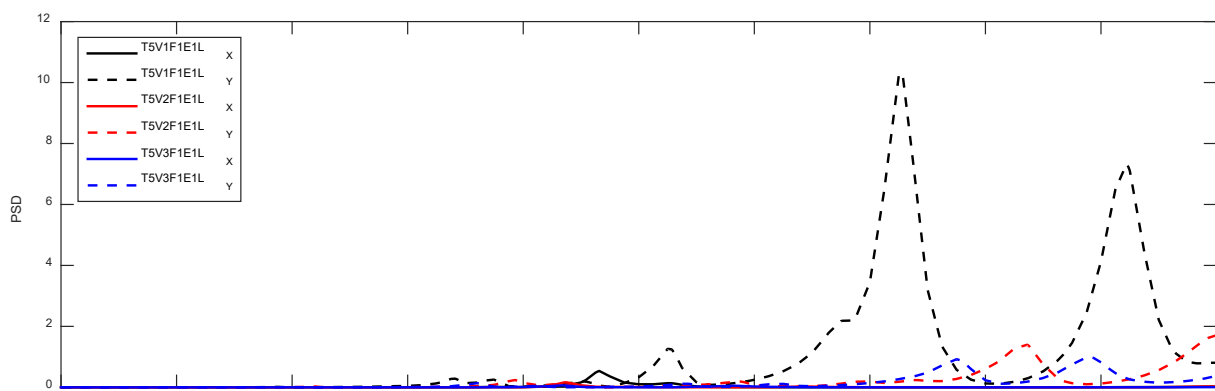


Fig 25-73: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1

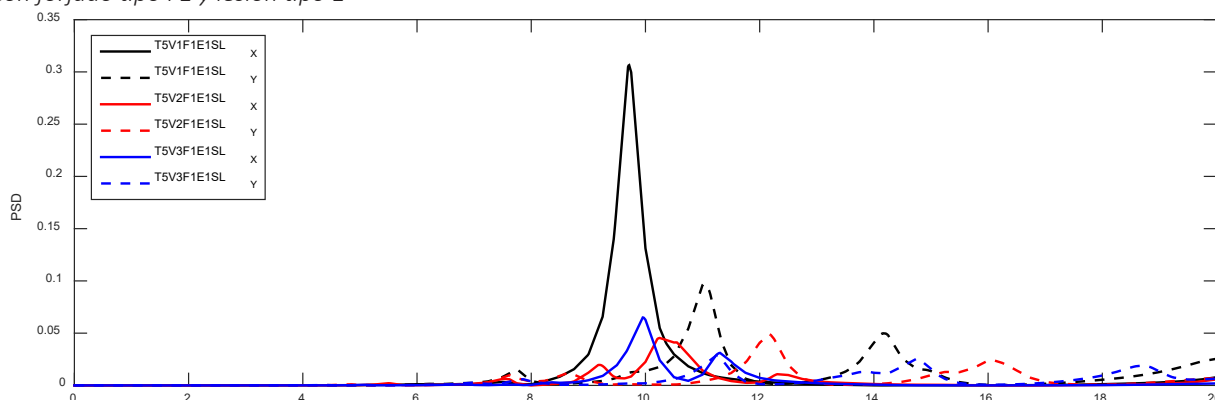


Fig 25-74: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F1 y sin lesiones

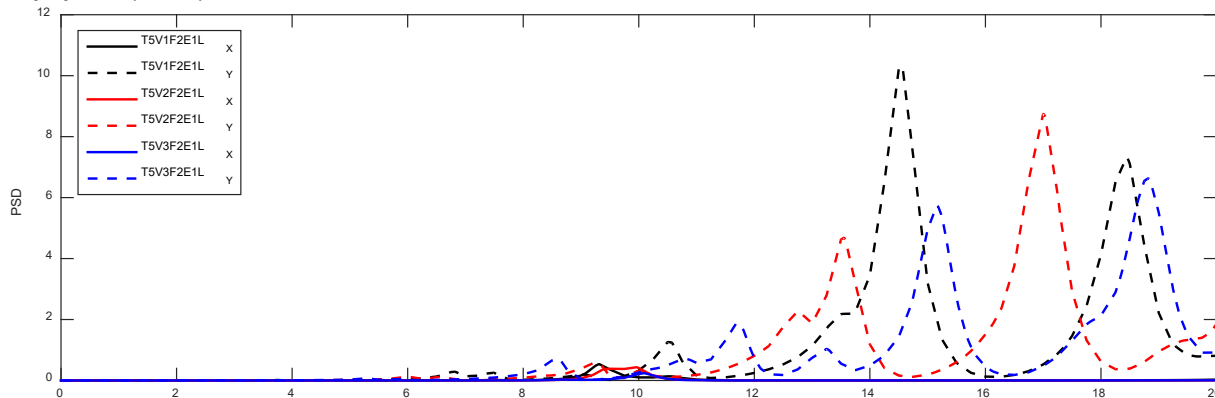


Fig 25-75: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1

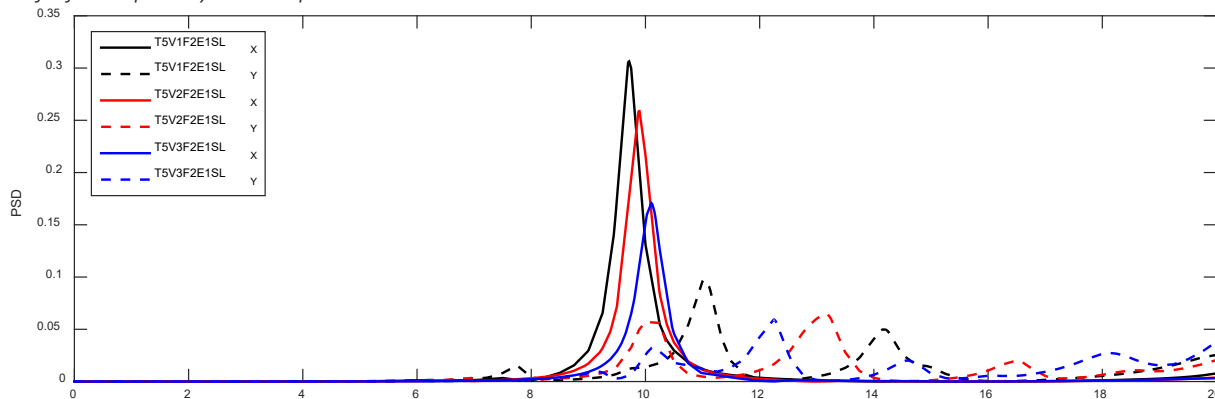


Fig 25-76: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F2 y sin lesiones

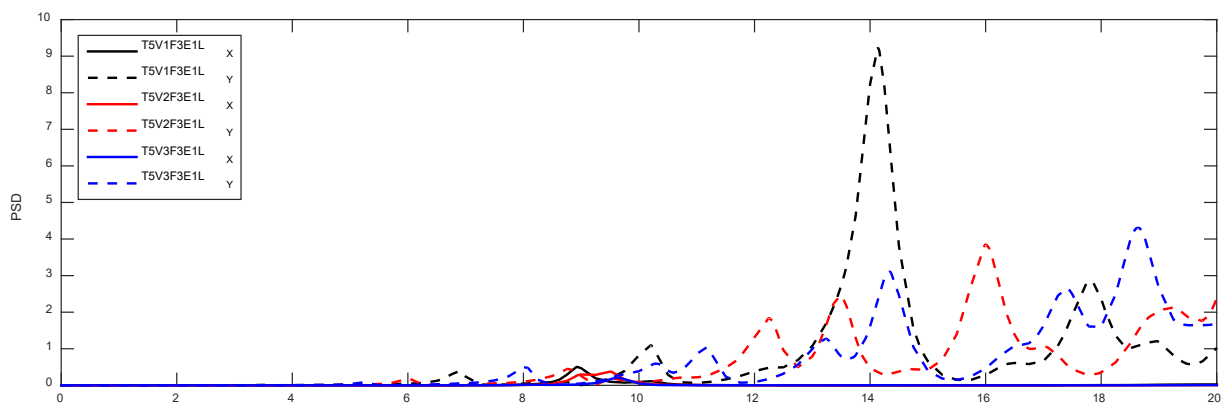


Fig 25-77: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1

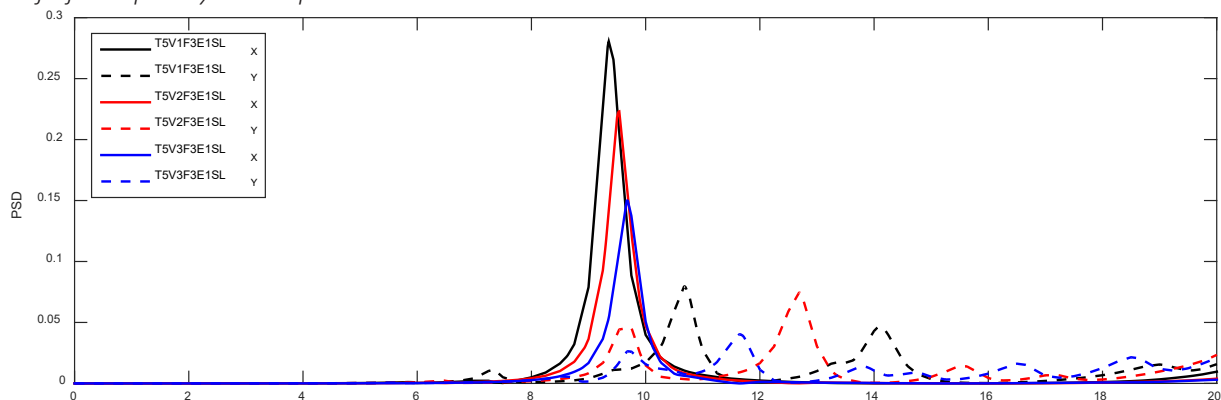


Fig 25-78: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F3 y sin lesiones

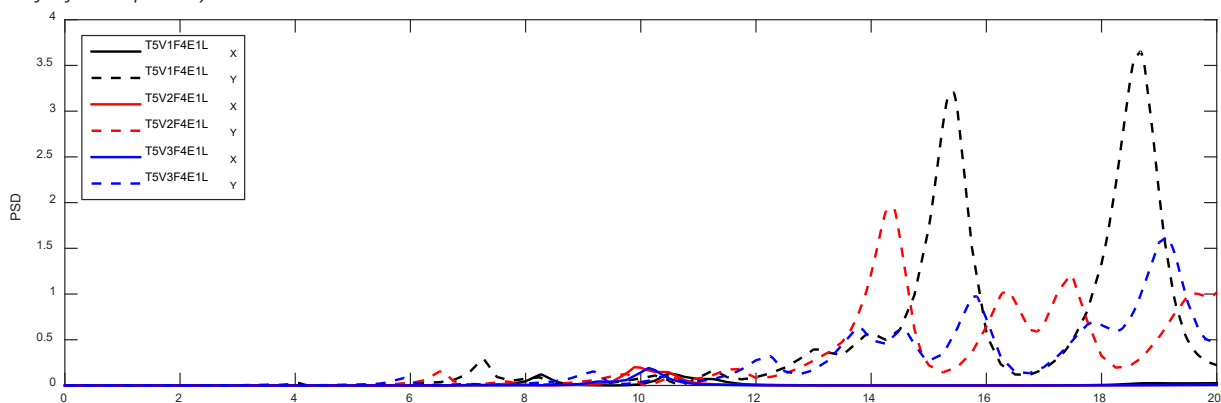


Fig 25-79: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1

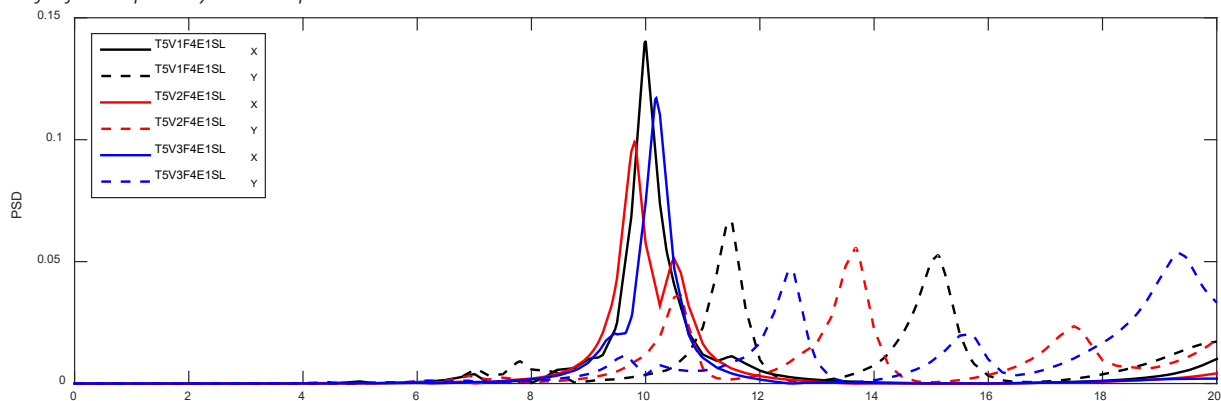


Fig 25-80: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F4 y sin lesiones

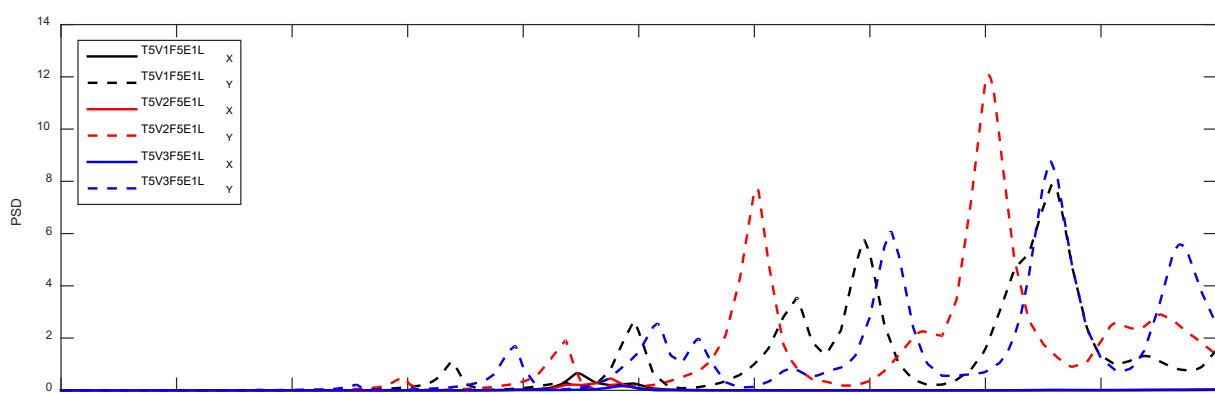


Fig 25-81: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1

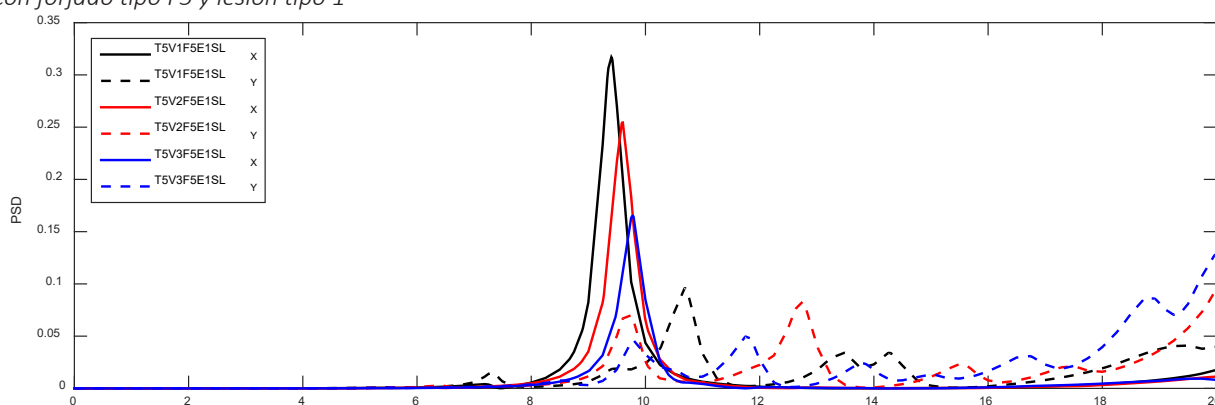


Fig 25-82: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F5 y sin lesiones

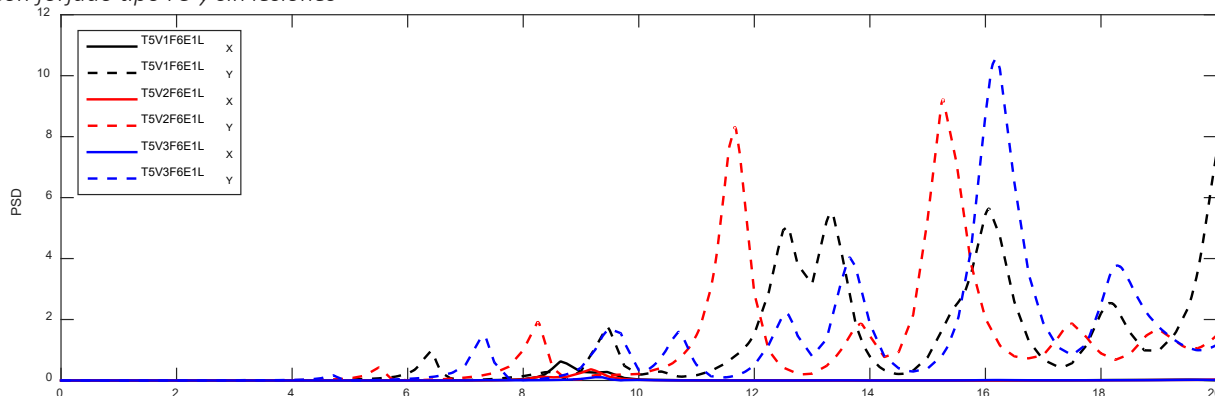


Fig 25-83: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1

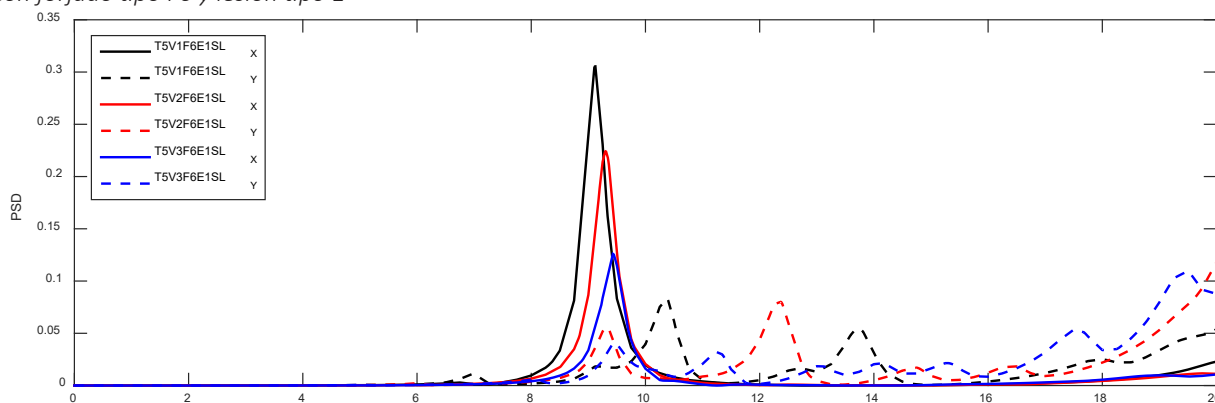


Fig 25-84: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F6 y sin lesiones

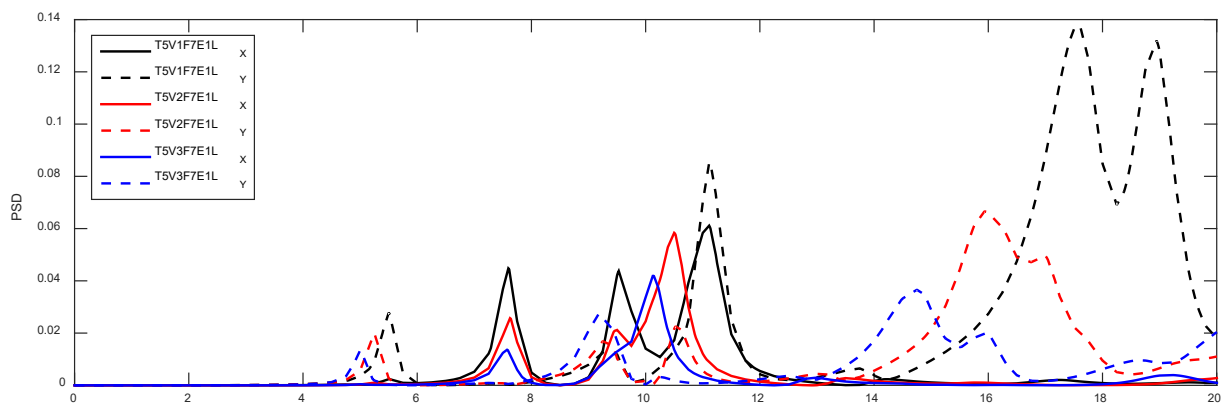


Fig 25-85: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1

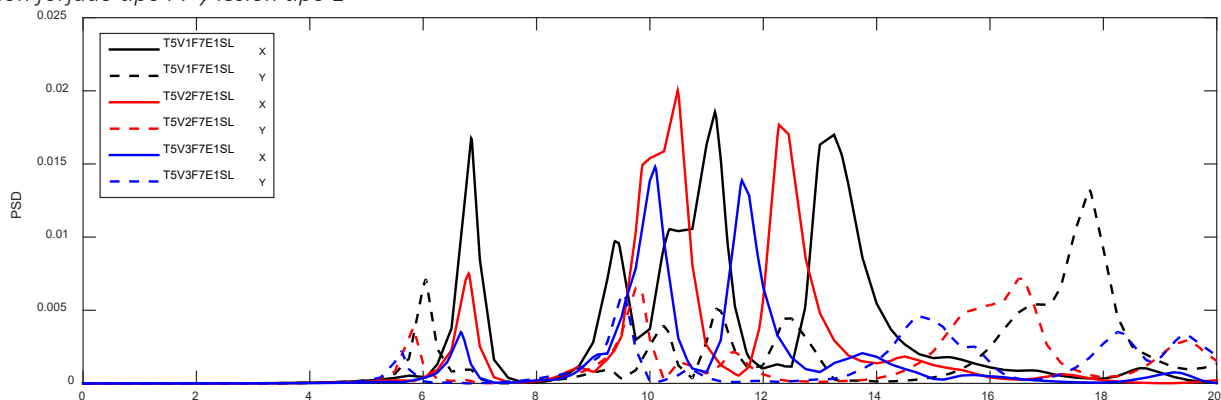


Fig 25-86: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F7 y sin lesiones

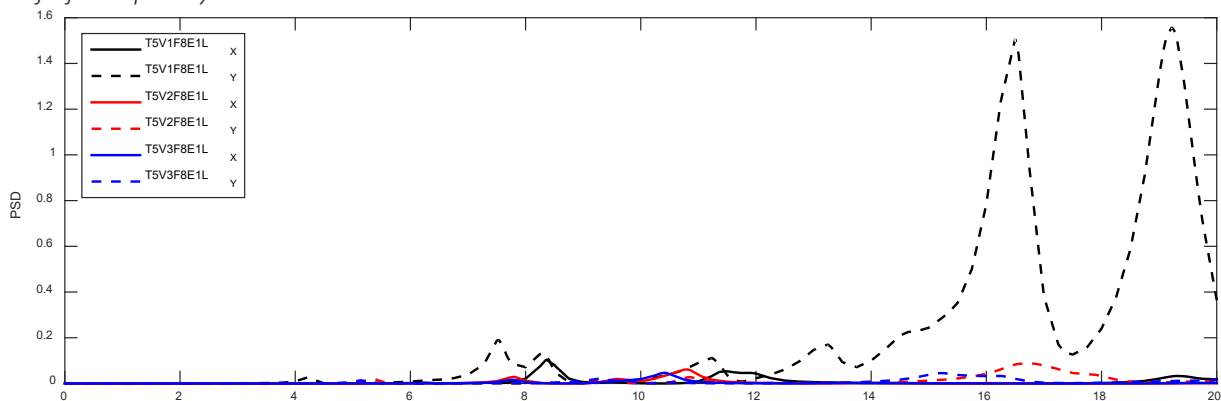


Fig 25-87: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1

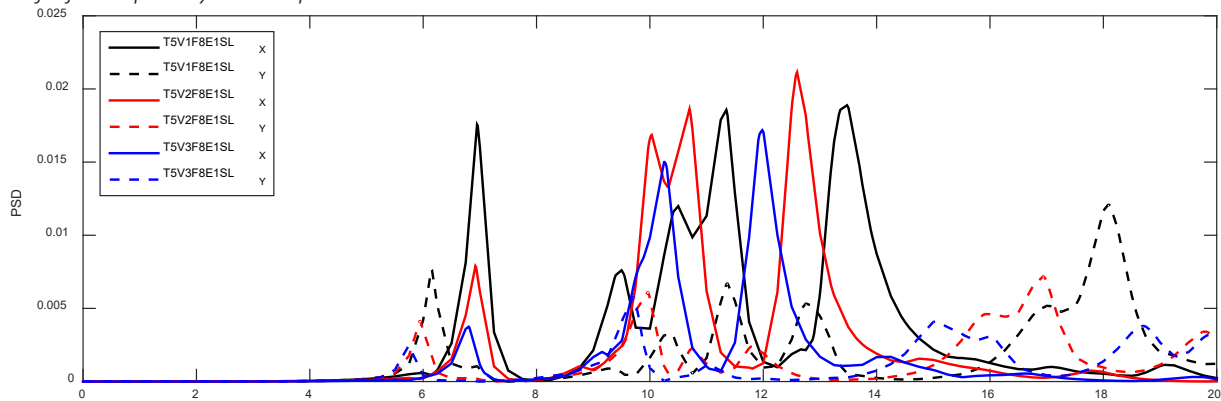


Fig 25-88: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F8 y sin lesiones

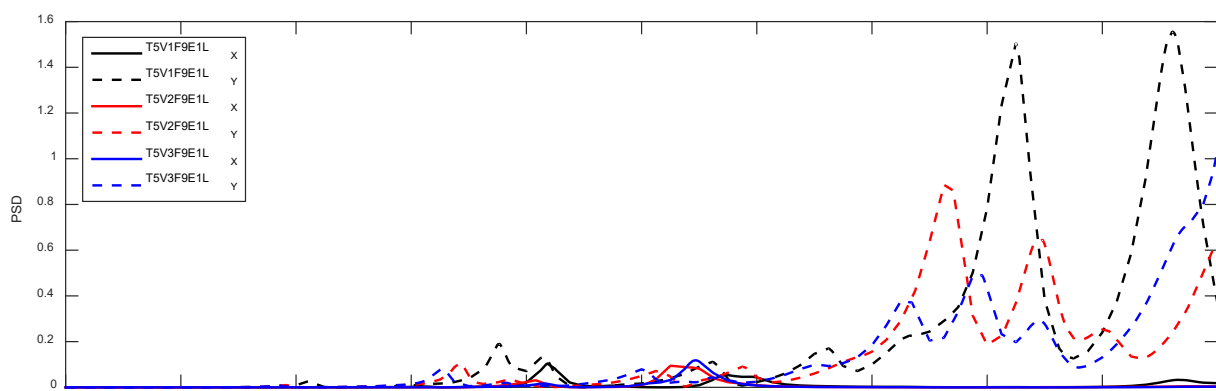


Fig 25-89: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1

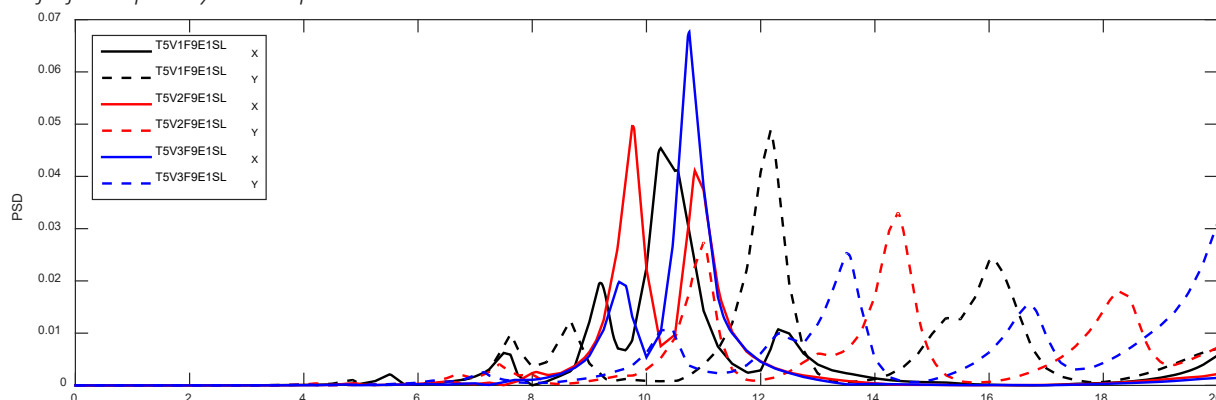


Fig 25-90: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 5 con forjado tipo F9 y sin lesiones

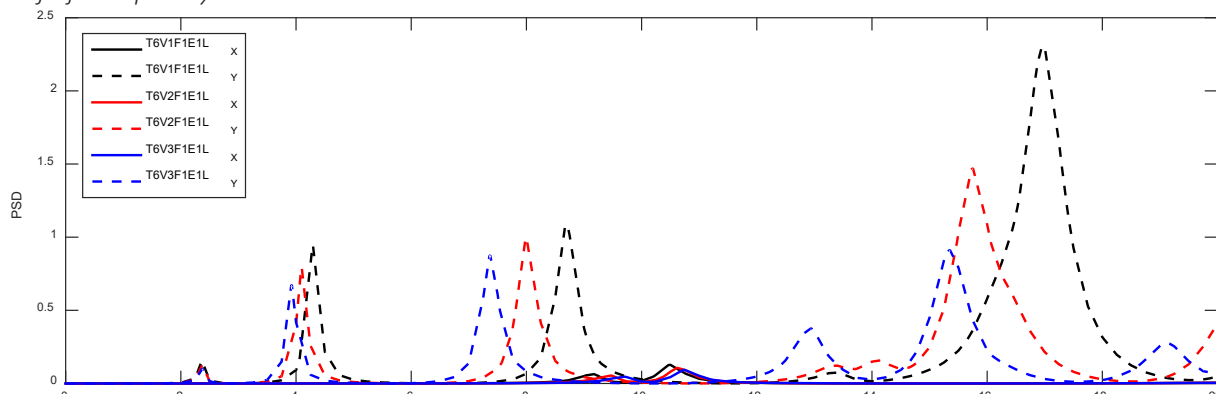


Fig 25-91: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F1 y lesión tipo 1

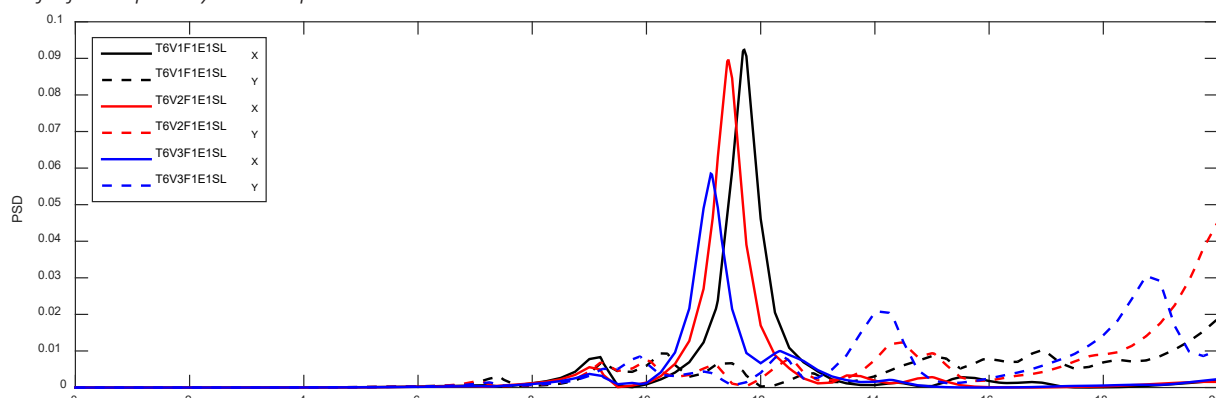


Fig 25-92: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F1 y sin lesiones

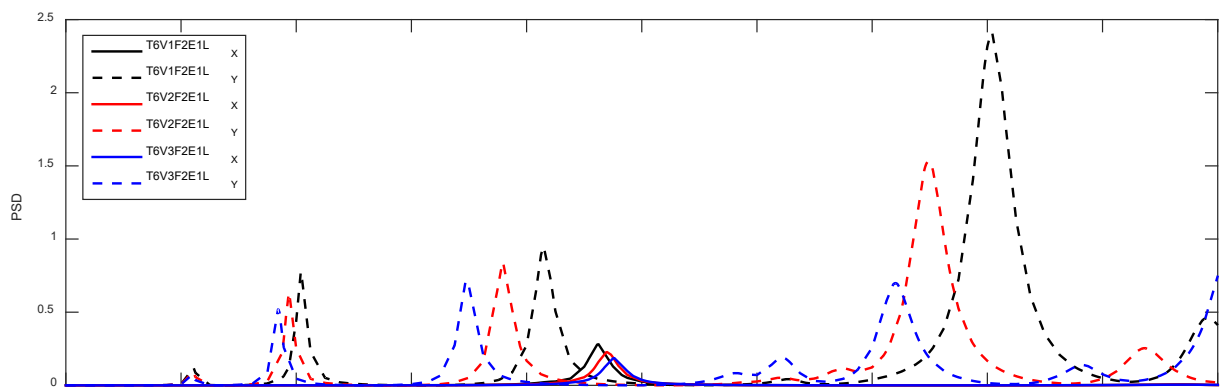


Fig 25-93: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F2 y lesión tipo 1

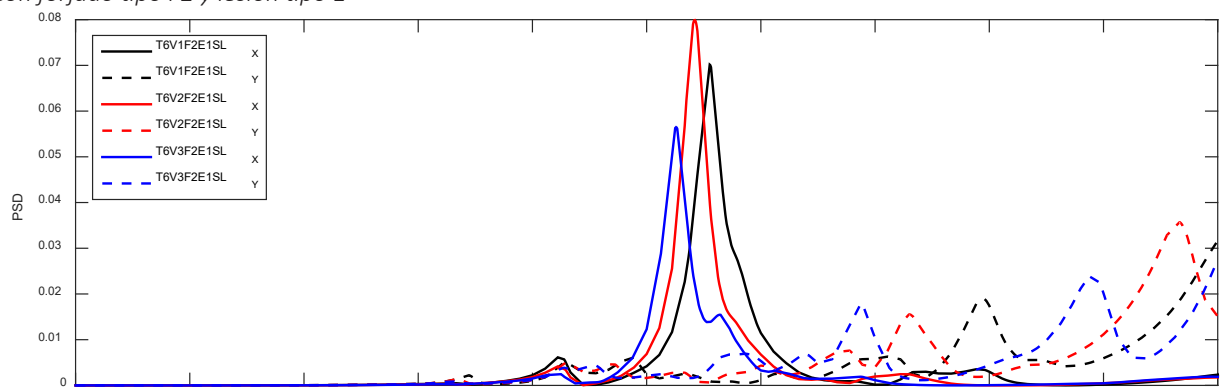


Fig 25-94: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F2 y sin lesiones

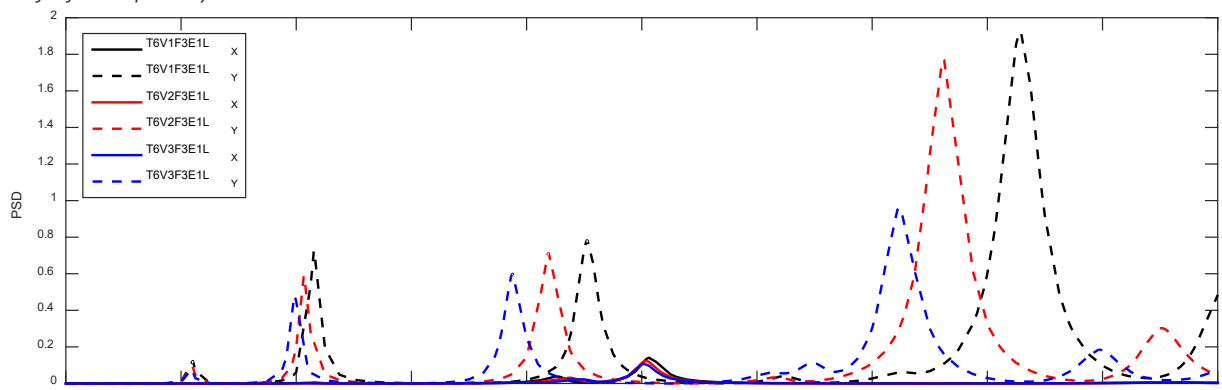


Fig 25-95: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F3 y lesión tipo 1

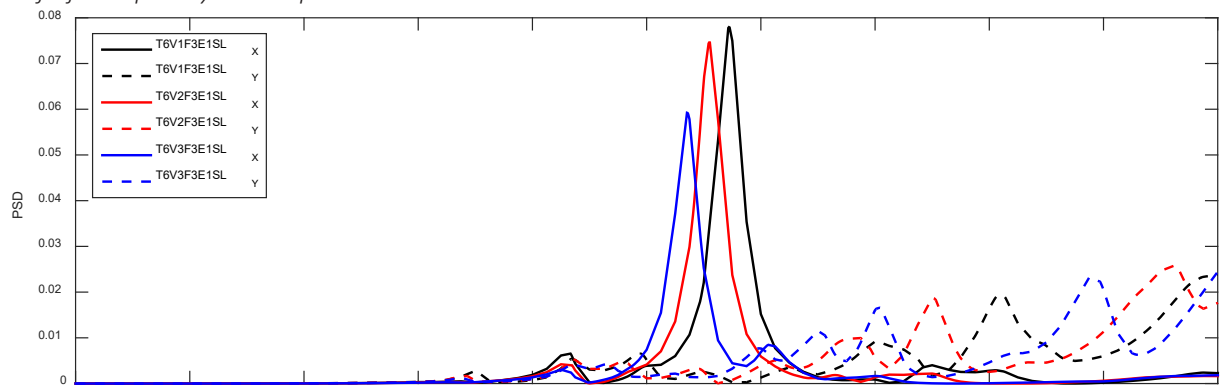


Fig 25-96: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F3 y sin lesiones

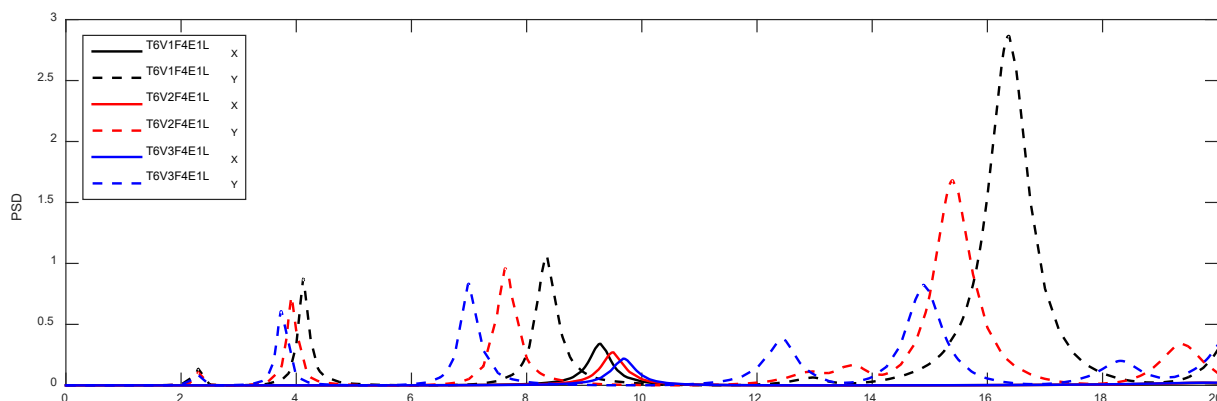


Fig 25-97: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F4 y lesión tipo 1

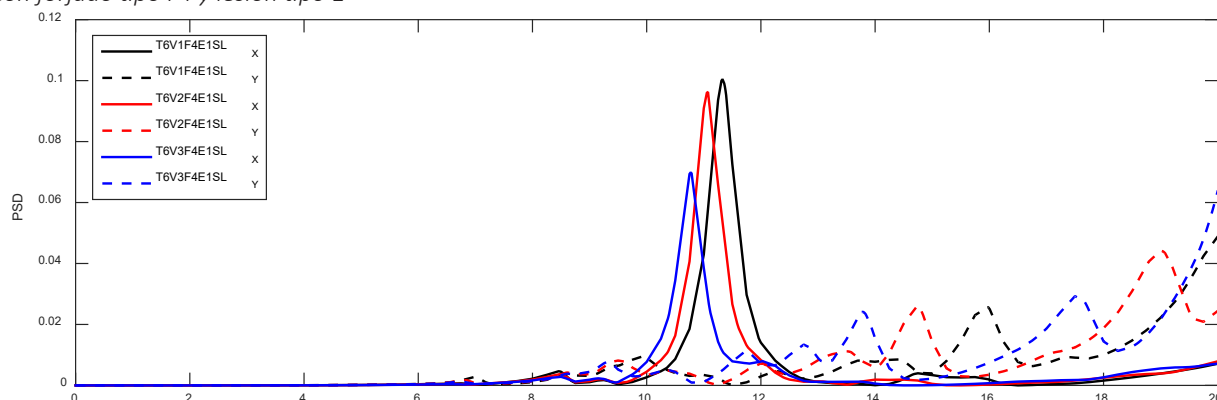


Fig 25-98: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F4 y sin lesiones

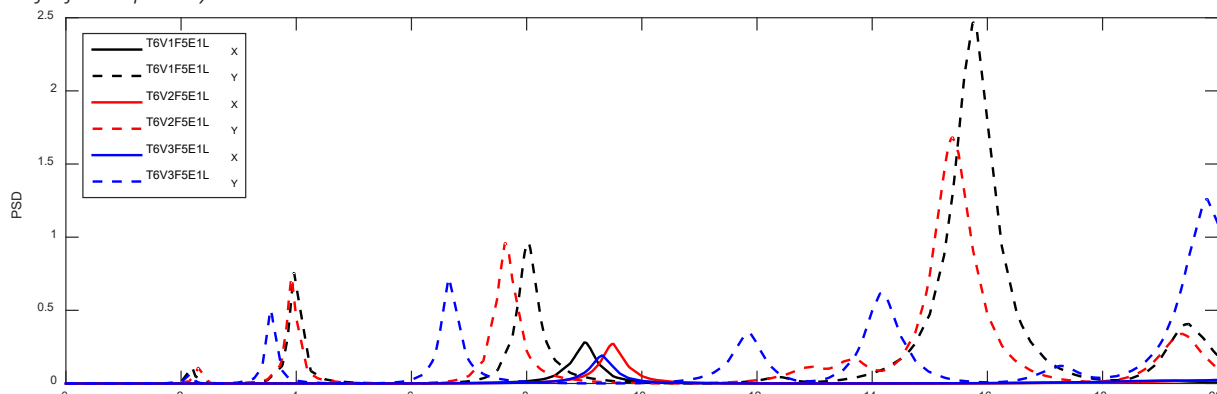


Fig 25-99: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F5 y lesión tipo 1

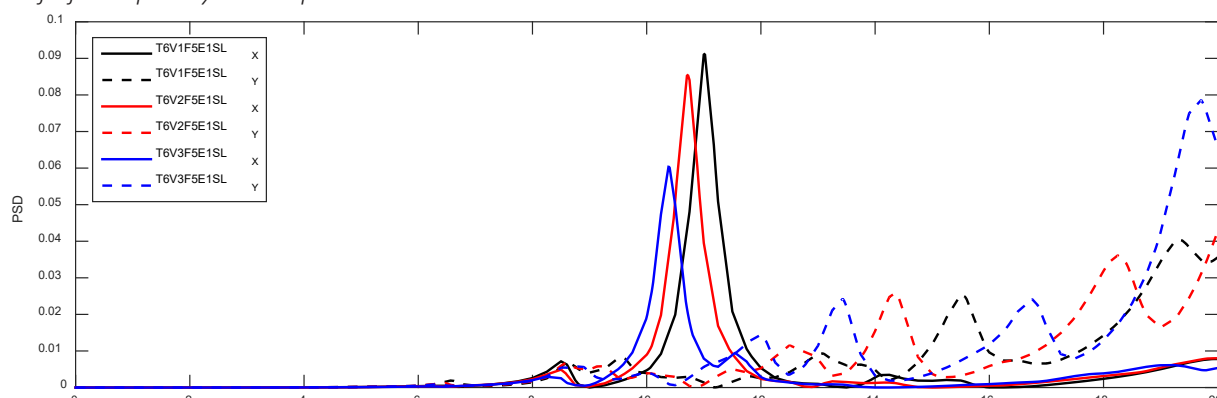


Fig 25-100: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F5 y sin lesiones

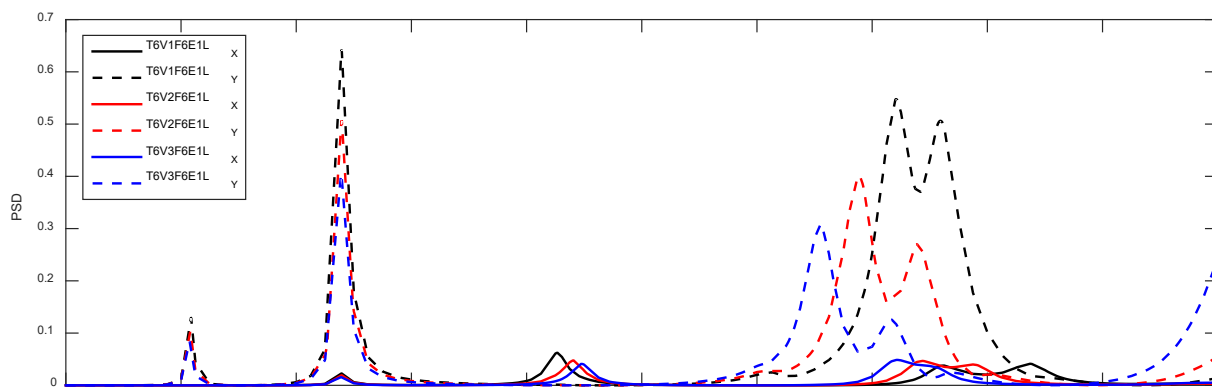


Fig 25-101: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F6 y lesión tipo 1

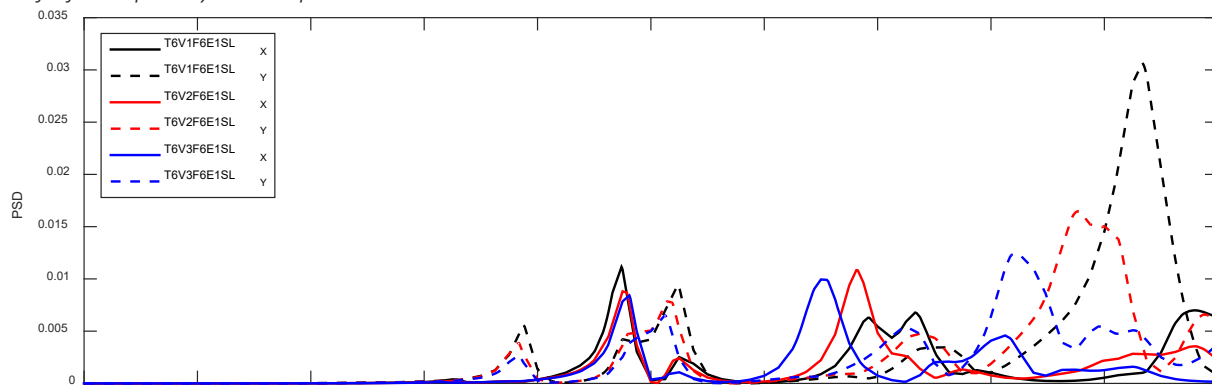


Fig 25-102: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F6 y sin lesiones

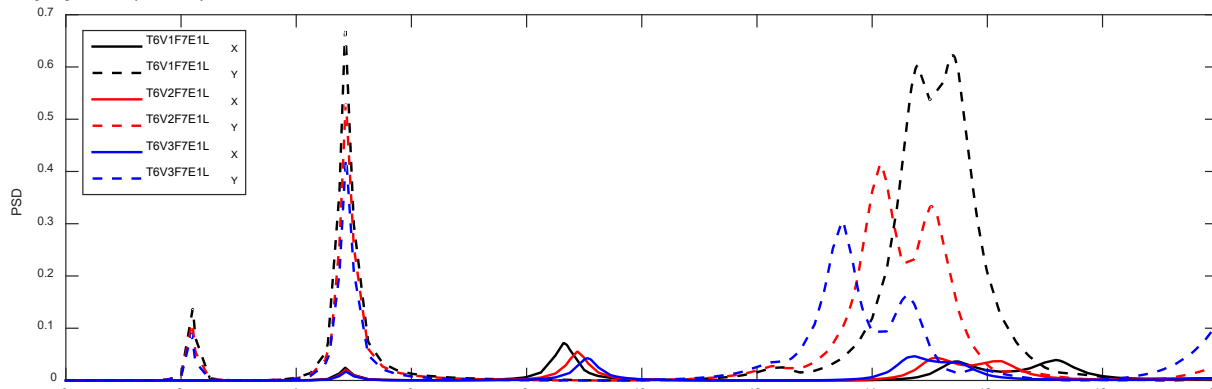


Fig 25-103: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F7 y lesión tipo 1

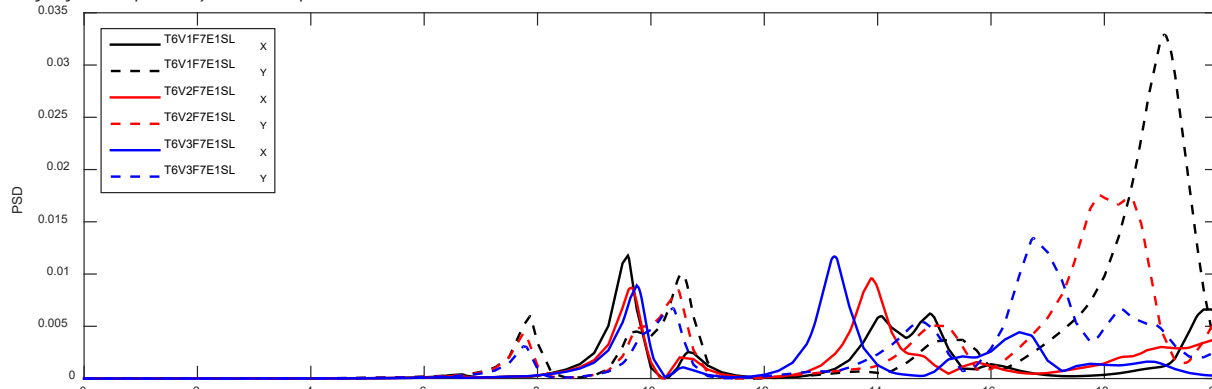


Fig 25-104: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F7 y sin lesiones

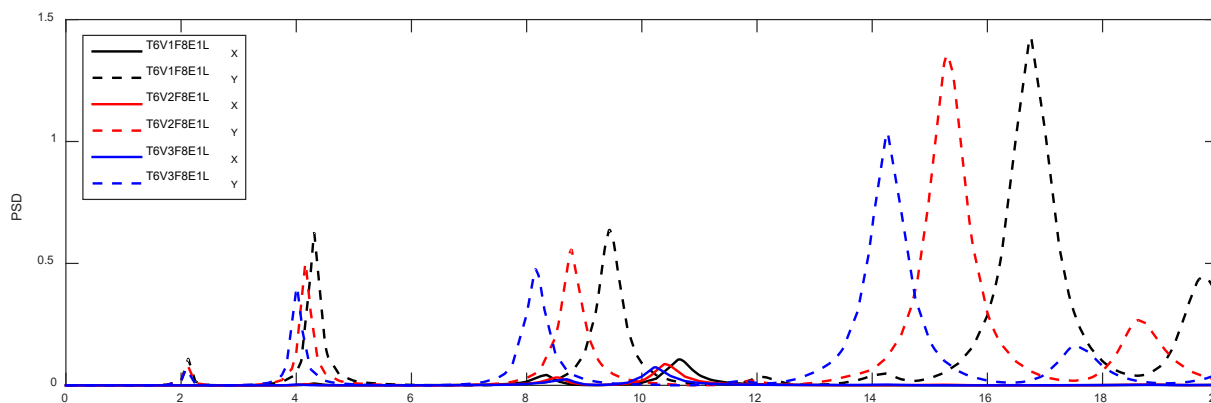


Fig 25-105: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F8 y lesión tipo 1

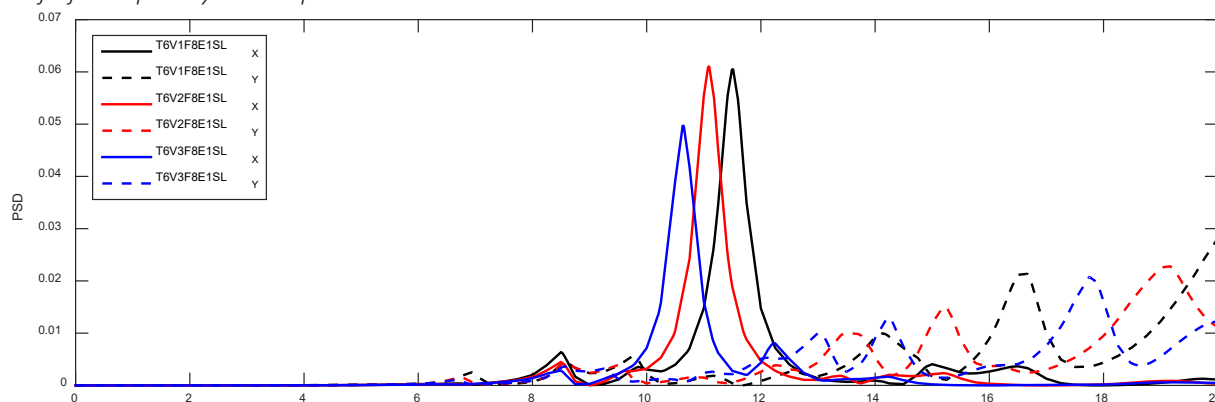


Fig 25-106: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F8 y sin lesiones

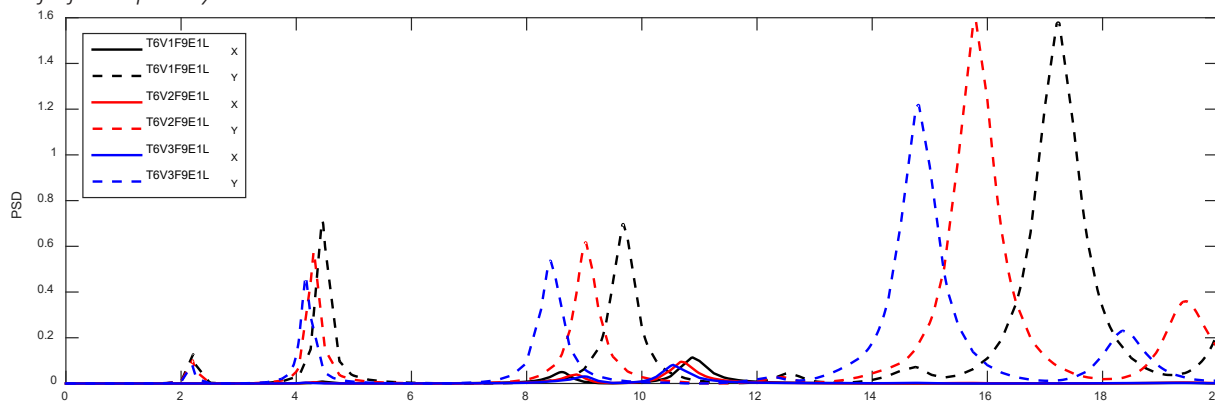


Fig 25-107: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F9 y lesión tipo 1

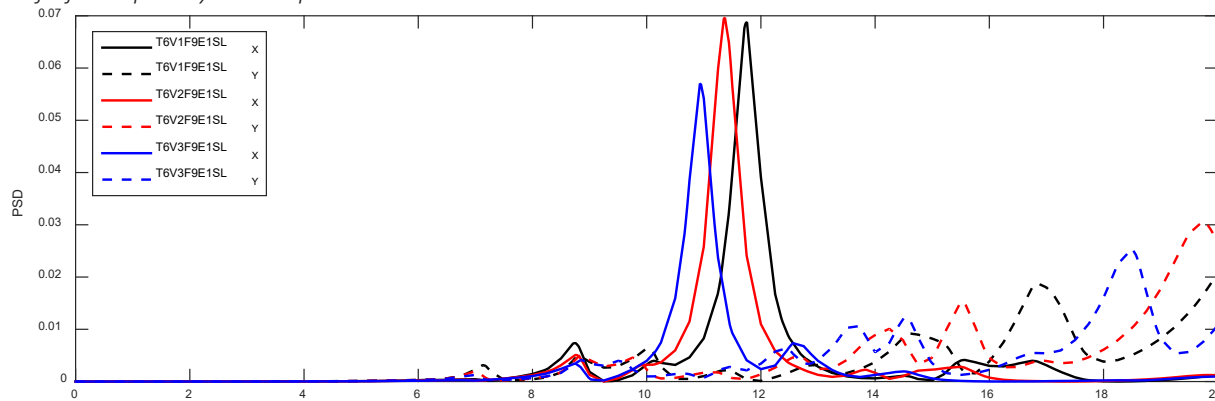


Fig 25-108: Gráficas PSD en la dirección X e Y correspondientes a las tres variantes dimensionales del modelo tipo 6 con forjado tipo F9 y sin lesiones

